



**Nuno Filipe Queiroga Carrilho**

Licenciatura em Ciências da Engenharia do Ambiente

**Valorização de Bio-Resíduos Alimentares  
por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de  
Estudo: *Campus da FCT/UNL***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Energia e Bioenergia

Orientador: Professor Doutor Nuno Lapa (DCTB-FCT-UNL)  
Co-orientador: Doutor Santino Di Berardino (UB-LNEG)

**Júri:**

Presidente: Professora Doutora Benilde Mendes  
Arguente: Professor Doutor João Morais  
Vogais: Professor Doutor Nuno Lapa  
Doutor Santino Di Berardino



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2012



# **Valorização de Bio-Resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo: Campus da FCT/UNL**

“Copyright” Nuno Filipe Queiroga Carrilho, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor”.





## **Agradecimentos**

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de forma directa ou indirecta, para a concretização deste trabalho.

À Professora Doutora Benilde Mendes, pelo excelente Mestrado, que tive a possibilidade de frequentar.

Ao Professor Doutor Nuno Lapa, por ter acarinhado o tema da dissertação, por todos os concelhos e orientação transmitidos ao longo deste percurso e pela revisão que efectuou ao trabalho em causa.

Ao Doutor Santino Di Berardino por todos os conhecimentos, informação e disponibilidade, que sempre demonstrou ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Eng. Jorge Magalhães da FCT/UNL por toda a informação disponibilizada.

Aos meus amigos, por todos os momentos de descontração, ao longo deste trabalho.

À minha família e em particular aos meus pais e irmão por toda a força, confiança e incentivo, que foi determinante ao longo deste trabalho.

À Cátia pela sua paciência, apoio e incentivo.

A Todos, Muito Obrigado!



## Resumo

A digestão anaeróbia é uma tecnologia que, embora não seja nova, apresenta um futuro muito promissor dado que contribui para a resolução de dois problemas cada vez mais prementes nas sociedades actuais: a produção de resíduos e a disponibilização de energia.

Com o presente trabalho pretendeu-se realizar uma pesquisa bibliográfica com especial enfoque para a selecção das melhores condições de operação de uma unidade de digestão anaeróbia descentralizada que valorize a fracção orgânica de resíduos sólidos urbanos correspondentes a resíduos alimentares.

A par deste objectivo pretendeu-se estudar a viabilidade técnica, económica e energética de uma unidade de digestão anaeróbia descentralizada, a instalar no *Campus* da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, que cumpra com toda a legislação nacional e comunitária relativamente à valorização deste tipo de resíduos.

Através deste estudo foi possível apurar que actualmente existe a tecnologia necessária para a criação de uma unidade de digestão anaeróbia de pequena escala, que valorize os resíduos alimentares de forma descentralizada e que cumpra com toda a legislação específica existente nesta matéria.

A unidade de digestão anaeróbia estudada para o *Campus* da FCT/UNL apresentou um balanço energético muito favorável à sua implementação. Relativamente à análise financeira esta não se apresentou financeiramente viável em nenhuma das alternativas analisadas.

**Palavras-Chave:** Digestão Anaeróbia Descentralizada; Bio-resíduos Alimentares; Biogás



## **Abstract**

Anaerobic digestion is a technology that is not new, despite this has a very future promising future as it contributes to solve two increasingly pressing problems of the today's society, that are the production of waste and the availability of energy.

The present work, intended to conduct a literature review with special focus, on the selection of the best operating conditions for a decentralized anaerobic digestion unit, that values the organic fraction of municipal solid waste related to food waste.

The intention was also to study the technical, economical and energetics viability, of a decentralized anaerobic digestion unit, to be installed on the Faculdade de Ciências e Tecnologia, of the Universidade Nova de Lisboa, which complies with all national and EU legislation regarding the valorization of this type of waste.

Through this study it was found that currently exists, all the required technology to create a unit of small-scale anaerobic digestion, which values the food waste on a decentralized basis and meets all the existing specific legislation in this area.

The anaerobic digestion unit studied for the Campus of FCT / UNL has showed a very favorable energy balance for its implementation. The financial analysis presented was not financially feasible in any of the alternatives considered.

**Keywords:** Decentralized Anaerobic Digestion; Canteen Wastes; Biogas



## **Símbolos e Abreviaturas**

AGV – Ácidos Gordos Voláteis

CBO – Carência Bioquímica de Oxigênio

CQO – Carência Química de Oxigênio

CSTR – *Continuously stirred tank reactor*

ENRRUBDA – Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Biodegradáveis Destinados aos Aterros

Eq. – Equação

PCI – Poder Calorífico Inferior

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

ppm – Partes por Milhão

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RUB – Resíduos Urbanos Biodegradáveis

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hidráulico

TRS – Tempo de Retenção de Sólidos

UE – União Europeia





## Índice de Matérias

Introdução .....	1
1. Enquadramento Legislativo .....	3
1.1. Definições .....	3
1.2. Legislação Nacional sobre Resíduos .....	3
1.3. Legislação referente à gestão de resíduos .....	5
1.4. Legislação Europeia de Resíduos .....	6
1.5. Legislação Específica – Unidades de Digestão Anaeróbia .....	6
1.6. Venda de energia eléctrica à rede .....	8
2. História da Digestão Anaeróbia .....	9
3. Processo Bioquímico da Digestão Anaeróbia .....	11
3.1. Hidrólise .....	12
3.2. Acidogénese .....	12
3.3. Acetogénese .....	13
3.4. Metanogénese .....	13
4. Parâmetros de reacção .....	15
4.1. Temperatura .....	15
4.2. pH .....	16
4.3. Nutrientes .....	17
4.4. Substâncias inibidoras ou tóxicas .....	18
5. Parâmetros Operacionais .....	21
5.1. Carga Orgânica .....	21
5.2. Tempo de Retenção Hidráulico .....	21
5.3. Agitação e mistura do digestor .....	23
5.4. Sistema de Aquecimento de um Digestor .....	24
6. Digestores Anaeróbios .....	25
6.1. Caracterização geral .....	25
6.2. Teor de humidade .....	26
6.3. Alimentação ao Digestor .....	27
6.4. Número de Etapas .....	27
6.5. Tipologia de digestores .....	28
7. Unidades de Digestão Anaeróbia .....	31
7.1. Unidades de Digestão Anaeróbia de Cúpula Fixa .....	32
7.2. Unidades de Digestão Anaeróbia de Cúpula Flutuante .....	34
7.3. Unidades de Digestão Anaeróbia de Saco .....	36
8. Unidades de Digestão Anaeróbia centralizadas existentes em média e grande escala para valorização de resíduos sólidos orgânicos .....	37
9. Unidades de Digestão anaeróbia existentes em Portugal .....	41
9.1. Biogás produzido através da fracção fermentável dos RSU em Portugal .....	42
Caso de Estudo da Valorização da Fracção Orgânica dos RSU do <i>Campus</i> da FCT/UNL .....	43
10. Caracterização do Caso de Estudo: <i>Campus</i> da FCT/UNL .....	43
10.1. Localização e organização .....	43

10.2.	População .....	44
10.3.	Consumos de electricidade, água e gás .....	44
10.4.	Resíduos produzidos .....	45
10.5.	Estimativa dos bio-resíduos alimentares produzidos .....	47
10.6.	Caracterização dos bio-resíduos alimentares produzidos no <i>Campus</i> da FCT/UNL .....	50
11.	Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta .....	53
11.1.	Critérios de construção e dimensionamento .....	53
11.2.	Bio-resíduos alimentares a valorizar na unidade de digestão anaeróbia .....	53
11.3.	Sistema de Recolha de Resíduos .....	54
11.4.	Parâmetros de Funcionamento da Unidade de Digestão Anaeróbia .....	56
11.5.	Condições de Funcionamento da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta .....	58
11.6.	Representação Esquemática e Processual da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta .....	60
12.	Descrição do Processo e dos Equipamentos.....	65
12.1.	Armazenamento dos resíduos.....	65
12.2.	Equipamentos de pré-tratamento dos resíduos .....	65
12.3.	Digestor Anaeróbio .....	68
12.4.	Tanque de Armazenamento do Digerido .....	74
12.5.	Equipamentos de pós-tratamento do digerido .....	74
12.6.	<i>Outputs</i> do processo de digestão anaeróbia.....	74
12.6.1.	Digerido .....	74
12.6.2.	Biogás.....	75
12.7.	Armazenamento do biogás.....	76
12.8.	Purificação do Biogás.....	78
12.9.	Transporte de materiais entre os diversos equipamentos que compõem a unidade de digestão anaeróbia .....	79
12.10.	Start-up .....	80
12.11.	Segurança .....	80
12.12.	Odores .....	81
12.13.	Localização da Unidade de Digestão Anaeróbia no Campus da FCT/UNL .....	82
13.	Balanço Energético da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta.....	85
14.	Resolução de Dificuldades e Problemas Frequentes da Digestão Anaeróbia .....	89
15.	Manutenção e monitorização da unidade de digestão anaeróbia.....	91
16.	Análise Financeira da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta .....	93
	Conclusões .....	97
	Trabalhos Futuros .....	101
	Referências Bibliográficas .....	103

## Índice de Figuras

Figura 3.1 – Etapas do processo de digestão anaeróbia.....	11
Figura 4.1– Gama de temperatura e velocidade da reacção.....	15
Figura 5.1 – Esquema explicativo do processo de inibição da digestão anaeróbia devido a uma elevada carga orgânica .....	21
Figura 5.2 – Produção de biogás em função do Tempo de Retenção Hidráulico .....	22
Figura 5.3 – Principais tipos de sistemas de agitação e mistura existentes em digestores anaeróbios .....	23
Figura 6.1 – Aspectos a ter em consideração na escolha do digestor anaeróbio .....	26
Figura 6.2 – Digestor de mistura completa .....	28
Figura 6.3 – Digestor de leito de lamas de fluxo ascendente .....	29
Figura 6.4 – Digestor de contacto .....	29
Figura 6.5 – Digestor de fluxo pistão.....	29
Figura 6.6 – Tipos de digestores anaeróbios descontínuos .....	30
Figura 7.1 – Unidade de Digestão anaeróbia do Modelo Chinês .....	33
Figura 7.2 – Unidade de Digestão anaeróbia do Tipo Deenbandhu.....	33
Figura 7.3 – Unidade de Digestão anaeróbia do Tipo Camartec.....	34
Figura 7.4 – Unidade de Digestão anaeróbia do Modelo Indiano.....	35
Figura 7.5 – Unidade de Digestão anaeróbia Water Jacket .....	35
Figura 7.6 – Unidade de digestão anaeróbia de saco .....	36
Figura 10.1 – Planta <i>Campus</i> da FCT.....	43
Figura 10.2 – Localização dos gasómetros no <i>Campus</i> da FCT/UNL.....	45
Figura 11.1- Aspectos escolhidos para o funcionamento do digestor anaeróbio .....	58
Figura 11.2 – Diagrama de processo da unidade de digestão anaeróbia proposta com uma unidade de pasteurização (Alternativa 1).....	61
Figura 11.3 – Diagrama de processo da unidade de digestão anaeróbia proposta com um armazenamento de longa duração para o digerido (Alternativa 2) .....	62
Figura 11.4 – Diagrama do processo Alternativa 1 .....	62
Figura 11.5 – Diagrama do processo Alternativa 2 .....	63
Figura 12.1 – “Contaminantes” dos bio-resíduos alimentares.....	66
Figura 12.2 – Local de instalação da unidade de gestão anaeróbia .....	83



## Índice de Quadros

Quadro 1.1 – Objectivos ENRRUBDA para a escolha selectiva dos resíduos orgânicos .....	4
Quadro 2.1 – Principais Marcos Históricos relacionados com a digestão anaeróbia e com o biogás .....	9
Quadro 4.1 – Gamas de temperatura do processo de digestão anaeróbia .....	15
Quadro 4.2 – Principais vantagens e desvantagens de cada gama de temperaturas .....	16
Quadro 4.3 – Variações máximas de temperatura por gama de temperatura .....	16
Quadro 6.1 – Exemplos de resíduos usados na digestão anaeróbia, em função do teor de humidade. ....	26
Quadro 6.2 – Principais vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia por <i>via seca</i> e por <i>via húmida</i> .....	27
Quadro 7.1– Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa .....	32
Quadro 7.2 – Principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa existentes em muito pequena e pequena escala .....	33
Quadro 7.3 – Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante .....	34
Quadro 7.4 – Principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante existentes em muito pequena e pequena escala .....	35
Quadro 7.5 – Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de saco..	36
Quadro 7.6 – Unidade de digestão anaeróbia de saco existente em muito pequena e pequena escalas.....	36
Quadro 8.1 – Tipos de unidades de digestão anaeróbia usadas na valorização da fracção sólida dos resíduos sólidos orgânicos em média e grande escala .....	37
Quadro 9.1– Evolução histórica da potência total instalada das unidades de produção de biogás, em Portugal, incluindo aterros sanitários .....	41
Quadro 9.2 – Distribuição do potencial de instalação de unidades de valorização do biogás, por sector, em Portugal .....	41
Quadro 10.1– População do <i>Campus</i> da FCT no ano lectivo de 2010/2011 .....	44
Quadro 10.2 – Consumo da electricidade do <i>Campus</i> da FCT em 2010 .....	44
Quadro 10.3 – Consumo de água do <i>Campus</i> da FCT em 2010 .....	44
Quadro 10.4 – Consumo de gás do <i>Campus</i> da FCT em 2010.....	45
Quadro 10.5 – Produção estimada de RSU indiferenciados e depositados nos Ecopontos produzidos na FCT no ano de 2000.....	46
Quadro 10.6 – Produção estimada de RSU indiferenciados produzidos no ano lectivo 2006/2007 ..	46
Quadro 10.7 – Composição física dos RSU indiferenciados produzidos no ano lectivo 2006/2007 ..	47
Quadro 10.8 – Produção estimada de bio-resíduos alimentares, no ano lectivo de 2006/2007, tendo por base os dados apresentados na secção 10.4 .....	48
Quadro 10.9 – Produção estimada de bio-resíduos alimentares, no ano lectivo de 2010/2011, tendo por base a variação da população que desenvolve actividade no <i>Campus</i> da FCT/UNL.....	49
Quadro 10.10 – Número de refeições servidas no <i>Campus</i> da FCT, em 2011 .....	49

Quadro 10.11 – Produção estimada de bio-resíduos alimentares, tendo por base o número de refeições servidas nos espaços comerciais da FCT/UNL.....	50
Quadro 10.12 – Composição dos bio-resíduos alimentares .....	51
Quadro 10.13 – Densidade dos bio-resíduos alimentares .....	51
Quadro 11.1 – Produção de bio-resíduos alimentares estimada, tendo por base os dados apresentados na secção 10.5. ....	53
Quadro 11.2 – Resíduos admissíveis e não admissíveis na digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares .....	55
Quadro 11.3 – TRH e Carga Orgânica usada em diversas unidades de digestão anaeróbia.....	57
Quadro 12.1 – Quantidade de biogás produzido através de digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares .....	75
Quadro 12.2 - Composição média do biogás produzido .....	76
Quadro 12.3 – Efeitos do ácido sulfídrico nos humanos.....	81
Quadro 13.1– Energia consumida pelos equipamentos da unidade de digestão anaeróbia .....	85
Quadro 13.2 – Consumo de Combustíveis da Unidade de digestão anaeróbia.....	86
Quadro 16.1 – Equipamentos a utilizar na unidade de digestão anaeróbia .....	93
Quadro 16.2 – Custos totais da unidade de digestão anaeróbia .....	95
Quadro 16.3 – Consumos mensais e custos anuais decorrentes da exploração da unidade de digestão anaeróbia .....	95
Quadro 16.4 – Receitas anuais decorrentes da exploração anual da unidade de digestão anaeróbia .....	96
Quadro 16.5 – Resumo da análise financeira .....	96

## Introdução

As sociedades modernas estão cada vez mais dependentes do uso de energia. Com a crescente procura de energia, por parte dos países em desenvolvimento, surge uma maior pressão na exploração de fontes de energia não renováveis como o petróleo, o carvão e o gás natural. O recurso a estas fontes de energia é uma solução cada vez mais dispendiosa, devido à percepção da sua finitude e da insustentabilidade ambiental decorrente da sua exploração e do seu consumo. Urge, assim, uma mudança no paradigma da produção e do consumo de energia, que diversos especialistas advogam. Esta modificação tem de ser encontrada no presente século para que se possa evitar graves alterações climáticas decorrentes da emissão de grandes quantidades de gases com efeito de estufa para a atmosfera terrestre (IEA, 2011).

Diversos estudos, como o conduzido pelo Massachusetts Institute of Technology, (Schreiber, 2007) mencionam que, com o actual estado de arte não existe uma tecnologia única que solucione o problema da energia, mencionando os mesmos que a aposta deverá passar por um conjunto de tecnologias que têm vindo a ser largamente estudadas e desenvolvidas pelo homem. Estas tecnologias baseiam-se essencialmente no uso de fontes de energia renováveis como o sol, água, vento, biomassa e bio-resíduos, entre outras.

É neste contexto que surge o presente trabalho que visa estudar a produção de biogás através de digestão anaeróbia descentralizada, a partir da fracção orgânica de resíduos provenientes de cantinas e restaurantes escolares.

A digestão anaeróbia é uma tecnologia que alia a valorização de resíduos orgânicos à produção de energia. A par da energia, o aumento da quantidade de resíduos em aterro é outro problema que as sociedades modernas enfrentam. Em 2005 existiam mais de 25 milhões de unidades de digestão anaeróbia descentralizadas em pequena escala instaladas em todo o Mundo, sendo que nessa altura a taxa de instalação de novas unidades rondava mais de um milhão por ano (Parker, 2007). A instalação destas unidades realiza-se, maioritariamente, em países em desenvolvimento como a China e a Índia. Nos países Europeus é essencialmente realizada através de digestão anaeróbia centralizada, em unidades de grande escala, devido às vantagens das economias de escala e à rentabilidade económica e energética da produção de electricidade ou de biometano.

O presente trabalho para além de ter por objectivo realizar uma pesquisa bibliográfica, com especial enfoque para a selecção das melhores condições de operação de uma unidade de digestão anaeróbia, visa estudar a viabilidade técnica, económica e energética de uma unidade de digestão anaeróbia descentralizada, a instalar no *Campus* da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, que cumpra com toda a legislação nacional e comunitária relativamente à valorização da fracção orgânica de resíduos sólidos urbanos correspondente aos resíduos alimentares.

Na análise do presente trabalho há que ter em consideração que a acção de redução dos desperdícios alimentares é de maior importância do que a produção de biogás a partir dos mesmos, pelo que devem ser incentivadas campanhas como a lançada pela Eurest Portugal, em 2007, intitulada “Consumo Consciente Respeita o Ambiente”. Esta campanha, vencedora da categoria de comunicação dos “Green Project Awards 2011”, teve por objectivo consciencializar os consumidores para a redução dos desperdícios alimentares no dia-a-dia.



## **1. Enquadramento Legislativo**

### **1.1. Definições**

O Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro, estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos e define os mesmos como: “quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer, nomeadamente os previstos em portaria dos Ministros da Economia, da Saúde, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente, em conformidade com o Catálogo Europeu de Resíduos, aprovado por decisão da Comissão Europeia”. Já o Livro Verde da Comunidade Europeia, de 3 de Dezembro de 2008, define bio-resíduos como: “os resíduos biodegradáveis de jardins e parques, os resíduos alimentares e de cozinha das habitações, dos restaurantes, das unidades de *catering* e retalhistas e resíduos similares das unidades de transformação de alimentos”. Esta definição não inclui os produtos residuais silvícolas e agrícolas, o estrume, as lamas de depuração, nem outros resíduos biodegradáveis como os têxteis naturais, o papel ou a madeira transformada.

### **1.2. Legislação Nacional sobre Resíduos**

Em seguida apresenta-se um breve enquadramento sobre alguns dos principais instrumentos legislativos nacionais, no que toca à gestão dos RSU, dando especial enfoque aos bio-resíduos alimentares.

#### **PERSU I**

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos I (PERSU I) foi aprovado em Julho de 1997 e constitui o verdadeiro precursor da organização dos Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal. Seguidamente apresenta-se um resumo das metas previstas pelo PERSU I no início da sua implementação e o seu estado aquando do término do programa (Maotdr, 2007):

- Erradicação das lixeiras: foi cumprida;
- Em 2005, 63% dos resíduos produzidos foram depositados em aterro, um valor muito superior aos 23% previstos no Plano;
- A valorização orgânica dos RSU ficou pelos 7% do total de RSU contra os 25% previstos para 2005;
- A incineração de RSU atingiu um valor ligeiramente inferior ao previsto;
- A recolha selectiva de RSU alcançou, em 2005, o valor de 9% contra os 25% previstos;
- O ritmo de produção de RSU até 2005 não decresceu 3% por ano, como estava inicialmente previsto.

Apesar do PERSU I não ter atingido as metas previstas, foi um plano muito importante, pois optimizou todos os circuitos de recolha e de transporte dos RSU e implementou ainda os sistemas Municipais e Intermunicipais de gestão de RSU.

#### **Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Biodegradáveis Destinados aos Aterros**

A Estratégia Nacional para a Redução dos Resíduos Biodegradáveis Destinados aos Aterros (ENRRUBDA), apresentada pelo governo português, em Julho de 2003, visava reduzir, até Janeiro

de 2016, a quantidade de Resíduos Urbanos Biodegradáveis (RUB) que são depositados em aterro, em 35% face à quantidade total destes resíduos produzida em 1995. Para isto, a ENRRUBDA estabeleceu os objectivos quantitativos apresentados no Quadro 1.1, no que toca à recolha selectiva e correspondente valorização dos RUB.

Quadro 1.1 – Objectivos ENRRUBDA para a recolha selectiva dos resíduos orgânicos (Maotdr, 2007)

<b>Data</b>	<b>Objectivos ENRRUBDA para a recolha selectiva dos resíduos orgânicos</b>
2006	Recolher 10% dos resíduos orgânicos produzidos em 2002
2006-2016	Aumentar anualmente esta percentagem
2016	Recolher 100% dos resíduos orgânicos produzidos em 2002

A ENRRUBDA indica que estes objectivos irão ser alcançados através de um forte incentivo à recolha selectiva dos resíduos e através da reconversão / adaptação ou construção de unidades de compostagem e de digestão anaeróbia (Maotdr, 2007).

### **Lei-quadro dos Resíduos**

A Lei-quadro dos Resíduos, aprovada pelo Decreto-Lei n.º 178, de 5 de Setembro de 2006, aprovou o novo Regime Geral da Gestão dos Resíduos através da regulamentação das operações de gestão dos mesmos, no que diz respeito às operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como às operações de descontaminação de solos e à monitorização dos locais de deposição, após o encerramento das respectivas instalações. Este Decreto-Lei estabelece ainda a necessidade de elaboração de um novo plano específico de gestão de resíduos urbanos, o que originou o PERSU II.

### **PERSU II**

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos II (PERSU II), aprovado pela portaria de 28 de Dezembro de 2006, apontou estratégias, definiu prioridades e estabeleceu as metas a atingir no período entre 2007 e 2016 no que toca aos RSU. O PERSU II veio dar resposta à necessidade apontada pela Lei-quadro dos Resíduos e às dificuldades surgidas aquando da implementação da ENRRUBDA. O PERSU II reviu os objectivos e metas da ENRRUBDA.

O PERSU II prevê o reforço da valorização orgânica, através dos processos de digestão anaeróbia e de compostagem, efectuados através da implementação de um sistema de recolha selectiva de RUB recolhidos selectivamente (Maotdr, 2007). Este plano prevê ainda que as unidades de compostagem ou de digestão anaeróbia operem, numa primeira fase, através de RUB proveniente de recolha indiferenciada e que, à medida que os sistemas de recolha selectiva de RUB entrem em funcionamento, estas unidades operem com RUB provenientes de recolha selectiva.

### **Decreto-Lei n.º 73/2011**

O Decreto-Lei n.º 73/2011 constitui a mais recente alteração à Lei-quadro dos Resíduos, e transpõe a Directiva Quadro dos Resíduos da União Europeia.

O presente Decreto-Lei é aplicável às operações de gestão de resíduos destinadas a prevenir ou reduzir a produção de resíduos, o seu carácter nocivo e os impactes adversos decorrentes da sua produção e gestão, bem como a diminuição dos impactes associados à utilização dos recursos, de forma a melhorar a eficiência da sua utilização e a protecção do ambiente e da saúde humana.

Este Decreto-Lei, prevê no seu enquadramento legislativo:

- O reforço da prevenção da produção de resíduos, através da sua reutilização e reciclagem, incentivando o seu pleno aproveitamento no novo mercado organizado de resíduos, como forma de consolidar a valorização dos resíduos;
- O estabelecer de metas para a reutilização, reciclagem e outras formas de valorização de resíduos, a alcançar até 2020:
  - Aumento mínimo global de 50%, em peso, da quantidade de resíduos urbanos que são reciclados e reutilizados;
  - Aumento mínimo de 70%, em peso, de resíduos que sejam reutilizados com o intuito de proceder a operações de enchimento que utilizem resíduos como substituto de outros materiais, resíduos de construção e demolição não perigosos.
- A definição de requisitos para que substâncias ou objectos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos;
- O estabelecer de critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduo;
- Criação do mecanismo da responsabilidade alargada do produtor, tendo em conta o ciclo de vida dos produtos e materiais e não apenas a fase de fim de vida.

### **1.3. Legislação referente à gestão de resíduos**

O Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro, estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos, nomeadamente a sua recolha, transporte, armazenamento, tratamento, valorização e eliminação, de forma a não constituir perigo ou causar prejuízo para a saúde humana ou para o ambiente. Este Decreto-Lei estabelece ainda que as operações de armazenamento, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, estão sujeitas a autorização prévia. Os requisitos a que deve obedecer esta autorização prévia são dados através da portaria n.º 961/98, de 10 de Novembro.

O artigo 13, do capítulo V do Decreto-Lei n.º 67/98, de 18 de Março, estabelece as regras específicas a que o armazenamento de resíduos alimentares está sujeito, nomeadamente:

1. Os resíduos alimentares não devem ser acumulados em locais onde são manipulados alimentos, excepto na medida em que tal seja inevitável para a execução adequada do trabalho;
2. Os resíduos alimentares ou outros devem ser depositados em contentores que possam ser fechados;
3. Os contentores devem ser de fabrico adequado, mantidos em boas condições e permitir fácil limpeza e desinfecção;
4. Devem ser tomadas medidas adequadas para a remoção e armazenamento dos resíduos alimentares e outros;

5. Os locais de armazenamento dos resíduos devem ser concebidos e utilizados de modo a permitir boas condições de limpeza e impedir o acesso de animais e a contaminação dos alimentos, da água potável, dos equipamentos e das instalações.

#### **1.4. Legislação Europeia de Resíduos**

No que diz respeito ao enquadramento legislativo ao nível da UE, assume particular relevo a Directiva Quadro dos Resíduos n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro, que vem rever os conceitos chave da Directiva n.º 2006/12/CE, de 5 de Abril (Comunicação da Comissão n.º 667 de 2005). A Directiva Quadro dos Resíduos estabelece as medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactes adversos decorrentes da geração e gestão de resíduos, diminuindo os impactes gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização. Nesta directiva é proposta uma hierarquia de gestão de resíduos, em que a valorização orgânica constitui uma das opções de tratamento prioritárias.

Na sequência desta directiva, que indica a necessidade de proceder a uma avaliação da gestão dos bio-resíduos, surgiu a 3 de Dezembro de 2008, o Livro Verde sobre a gestão dos bio-resíduos na União Europeia. Este livro tem como objectivo explorar diversas possibilidades que potenciem um maior desenvolvimento da gestão dos bio-resíduos na União Europeia. O Livro Verde resume informações de base importantes sobre as políticas actuais no domínio da gestão dos bio-resíduos e novos resultados da investigação neste domínio, apresenta as principais questões para debate e convida as partes interessadas a contribuir com os seus conhecimentos e opiniões sobre a via a seguir.

#### **1.5. Legislação Específica – Unidades de Digestão Anaeróbia**

A União Europeia dispõe do Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, que estabelece as regras sanitárias relativas aos subprodutos animais não destinados ao consumo humano. Neste regulamento são relatados os requisitos específicos a que uma unidade de digestão anaeróbia está sujeita, quando inserida no espaço geográfico da União Europeia, e valoriza subprodutos animais ou bio-resíduos alimentares. Com este regulamento, a União Europeia pretende assegurar que todos os subprodutos animais, usados numa unidade de digestão anaeróbia, são submetidos a tratamentos padrão. O presente regulamento agrupa os subprodutos animais, não destinados ao consumo humano, em três categorias, relativamente à sua perigosidade:

- Categoria 1 – As matérias inseridas nesta categoria incluem animais ou partes de animais infectadas com doenças como Encefalopatias espongiformes transmissíveis e bio-resíduos alimentares importados de outros países. Os resíduos inseridos nesta categoria não podem ser valorizados em unidades de digestão anaeróbia, podendo ser eliminados através de incineração, co-incineração ou outro método específico;
- Categoria 2 – Os subprodutos animais incluídos nesta categoria correspondem a produtos de origem animal que contenham medicamentos e outros contaminantes em concentrações superiores aos limites estipulados e que tenham sido importados de países que não cumpram os requisitos veterinários comunitários. Alguns dos resíduos incluídos nesta

categoria, como o chorume e o conteúdo do aparelho digestivo, no caso de não apresentarem risco de propagação de uma doença transmissível, podem ser valorizados através de digestão anaeróbia, em condições específicas;

- Categoria 3 – Os materiais, inseridos nesta categoria incluem animais, partes de animais ou subprodutos de animais sãos, que não possuam doenças transmissíveis e bio-resíduos alimentares provenientes de restauração que não estejam inseridos na categoria 1. Os bio-resíduos alimentares, provenientes de restauração, compreendem os resíduos alimentares produzidos em restaurantes, cantinas e cozinhas domésticas. Os materiais inseridos na categoria 3 podem ser valorizados através de digestão anaeróbia, em condições específicas.

Segundo o presente regulamento, as instalação de digestão anaeróbia que visam estabilizar resíduos da categoria 3, têm de estar equipadas com uma unidade de higienização/pasteurização com as seguintes características:

- Dimensão máxima das partículas após saída da unidade: 12 mm;
- Temperatura mínima no interior da unidade: 70° C;
- Tempo de permanência mínimo, sem interrupções, no interior da unidade: 60 minutos.

O presente regulamento prevê que possam ser usados diferentes requisitos específicos, dos apresentados anteriormente, nas unidades de digestão anaeróbia, que valorizam bio-resíduos alimentares, desde que se garanta um efeito semelhante no que toca à redução dos organismos patogénicos.

No que diz respeito à presença de agentes patogénicos, o presente regulamento refere que: “as amostras representativas dos resíduos da digestão colhidas durante ou imediatamente após a transformação na unidade de biogás ou de compostagem com o objectivo de monitorizar o processo devem obedecer às seguintes normas: *Escherichia coli*:  $n=5$ ,  $c=1$ ,  $m=1000$ ,  $M=5000$  em 1 g, ou *Enterococaceae*:  $n=5$ ,  $c=1$ ,  $m=1000$ ,  $M=5000$  em 1 g. As amostras representativas dos resíduos da digestão ou do composto colhidas durante a armazenagem na unidade de biogás ou de compostagem ou no termo desta devem obedecer às seguintes normas: *Salmonella*: ausência em 25 g:  $n=5$ ,  $c=0$ ,  $m=0$ ,  $M=0$ .

Onde:

- $n$  = número de amostras a testar;
- $m$  = valor limite para o número de bactérias; o resultado é considerado satisfatório se o número de bactérias em todas as amostras não exceder  $m$ ;
- $M$  = valor máximo para o número de bactérias; o resultado é considerado insatisfatório se o número de bactérias numa ou mais amostras for igual ou superior a  $M$ ;
- $c$  = número de amostras cuja contagem de bactérias se pode situar entre  $m$  e  $M$ , sendo a amostra ainda considerada aceitável se a contagem de bactérias das outras amostras for igual ou superior a  $m$ .”

Para além do mencionado anteriormente relativamente à unidade de higienização /pasteurização, uma unidade de digestão anaeróbia que valorize resíduos da categoria 3 deve possuir:

- Sistemas que monitorizem a temperatura no interior do sistema de pasteurização, ao longo do tempo, assim como sistemas de segurança que impeçam que a mesma temperatura diminua;
- Laboratório que possibilite fazer as análises necessárias;
- Os recipientes usados para transportar material não tratado deverão ser limpos em área específica, projectada com o intuito de prevenir o risco de contaminação dos produtos tratados;
- Devem ser implementadas medidas preventivas, previstas num documento de controlo de pragas, com o intuito de evitar a presença de aves, roedores, insectos e outros animais no interior da unidade de digestão anaeróbia;
- A unidade de digestão anaeróbia deve ser limpa regularmente, devendo os procedimentos de limpeza serem documentados;
- Os equipamentos constituintes da unidade de digestão anaeróbia devem ser mantidos em bom estado de conservação e possuir calibrações regulares.

### **1.6. Venda de energia eléctrica à rede**

Em Portugal, a microprodução constitui a actividade de produção descentralizada de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência. Esta actividade é regulada pelo Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que foi alterado pelo Decreto-Lei n.º 118-A/2010, de 25 de Outubro, e pelo Decreto-Lei n.º 34/2011, de 8 de Março. O DL n.º 34/2011 classifica as instalações de microprodução em três escalões, em função da sua potência:

- Escalão I: até 20 kW;
- Escalão II: 20 a 100 kW;
- Escalão III: 100 a 250 kW;

O DL n.º 34/2011 prevê a remuneração de sistemas de microprodução através de uma tarifa bonificada, cujo valor é função do escalão de potência da instalação e do tipo de tecnologia de produção empregue. O preço de venda de energia eléctrica à rede das unidades que se inserem no escalão I e II é obtido com base na tarifa mais alta, resultante das maiores ofertas de desconto à tarifa de referência apuradas nos respectivos escalões. Para as unidades do escalão I, o preço de venda é calculado directamente com base na tarifa de referência, que para o ano de 2012 foi estabelecido pela Portaria n.º 285/2011 e possui o valor de 215 €/MWh<sup>-1</sup>. Através do DL n.º 34/2011 conclui-se que a tarifa bonificada de venda de energia eléctrica à rede a partir de biogás, durante os primeiros 15 anos do projecto, possui o valor de 129 €/MWh<sup>-1</sup>, correspondendo este valor a 60% da tarifa de referência. Após os primeiros 15 anos de funcionamento de uma unidade de microprodução, a energia passa a ser vendida ao preço de mercado, nas mesmas condições das grandes centrais de produção.

## 2. História da Digestão Anaeróbia

A história da digestão anaeróbia remonta a 1630, quando Von Helmont descobriu que era produzido um gás combustível através da degradação de material biológico. A esta conclusão chegou igualmente Shirley, em 1667. Nesta altura ainda não se falava em digestão anaeróbia ou seja, desconhecia-se o processo e desconhecia-se igualmente qual era o gás que resultava da degradação do material biológico e que podia ser queimado (Ostrem, Nickolas, 2004).

Foi em 1770 que começaram a aparecer os primeiros estudos relacionados com o biogás e com digestão anaeróbia. O Quadro 2.1 resume os principais marcos históricos relacionados com a digestão anaeróbia e com a produção de biogás, que conduziram ao actual estado de arte deste processo.

Quadro 2.1- Principais Marcos Históricos relacionados com a digestão anaeróbia e com o biogás (adaptado de Kossmann *et al.*, 1997)

Ano	Marco Histórico
1770	Volta recolheu gás dos pântanos e investigou o seu comportamento de queima.
1821	Avogadro identificou o metano (CH <sub>4</sub> ).
1875	Propoff afirmou que o biogás é produzido em condições anaeróbias.
1884	Pasteur investigou a produção de biogás através da cama de cavalos para iluminação pública.
1895	Donald Camerson construiu o primeiro tanque de recolha de águas residuais domésticas que armazenava o biogás e usava-o para a iluminação pública das ruas.
1913	Primeiro digestor anaeróbio a possuir aquecimento.
1920	Primeira estação de tratamento de águas residuais a recolher o biogás e a fornecer-lo à rede pública de gás.
1940	Adição de resíduos sólidos orgânicos para aumentar a produção de biogás a partir de águas residuais.
1950	Instalação da primeira grande unidade de tratamento de resíduos agro-pecuários.
1970	Nesta década foram instalados milhões de digestores anaeróbios de pequena escala e de baixo custo, nas zonas rurais da China e da Índia.
1974	A primeira grande crise da energia levou a um grande desenvolvimento da tecnologia de digestão anaeróbia.
1985	Os efluentes provenientes das explorações agropecuárias foram muito usados para produzirem biogás.
1990	A investigação científica conduziu à melhoria da eficiência do processo de digestão anaeróbia, através de uma mistura de substratos optimizada e de diferentes usos para o biogás.

Na China, o primeiro digestor anaeróbio foi construído na década de 40 por uma família rica. Na década de 70, o grande desenvolvimento da tecnologia e o forte incentivo por parte do governo chinês possibilitaram a construção de cerca de cinco milhões de digestores anaeróbios de pequena escala, com um volume que variava entre os 6 e os 10 m<sup>3</sup>; estes produziam biogás para a iluminação e para a confecção de alimentos (He, 1988). Em 1980, a China já possuía aproximadamente 7 milhões destes digestores. Actualmente, possui cerca de cinco milhões de digestores anaeróbios de pequena escala e mais de 20 milhões de pessoas usam o biogás como combustível (Kossmann *et al.*, 1997).

A Índia, à semelhança da China, possui actualmente diversos milhões de digestões anaeróbios de pequena escalada instalados e em operação (Kossmann *et al.*, 1997).



### 3. Processo Bioquímico da Digestão Anaeróbia

A Digestão Anaeróbia consiste num processo biológico no qual a matéria orgânica é decomposta na ausência de oxigénio dissolvido ou dos seus precursores, como por exemplo  $H_2O_2$  (Khanal, 2008). Da decomposição da matéria orgânica resulta biomassa estabilizada e uma mistura gasosa composta essencialmente por metano e dióxido de carbono, denominada por biogás (Taricska *et al.*, 2009).

Este processo ocorre naturalmente em pântanos, campos de arroz, no intestino dos animais e em sedimentos marinhos. Estima-se que aproximadamente 80% do metano ( $CH_4$ ) presente na atmosfera seja produzido através do processo de digestão anaeróbia (Palmisano, Morton, 1996).

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos é um processo muito complexo que envolve a produção de centenas de compostos intermediários e diferentes reacções bioquímicas, cada uma catalisada por diferentes enzimas (Malakahmad *et al.*, 2009).

De acordo com Alves (1998), no processo de digestão anaeróbia é possível distinguir-se sete fases:

1. Hidrólise de biopolímeros;
2. Fermentação de aminoácidos e açúcares;
3. Oxidação anaeróbia dos ácidos gordos de cadeia longa;
4. Oxidação anaeróbia dos produtos intermediários;
5. Homoacetogénese;
6. Conversão de acetato a metano;
7. Conversão do hidrogénio a metano.

Estas sete fases são habitualmente agrupadas em quatro etapas de degradação principais, em função da natureza dos microrganismos actuantes e do tipo de processamento do substrato, designadas por: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese (Haandel, Lettinga, 1994). Em geral as três primeiras etapas do processo de digestão anaeróbia, a hidrólise, acidogénese e acetogénese são designadas por fermentação ácida e a última etapa por fermentação metanogénica.

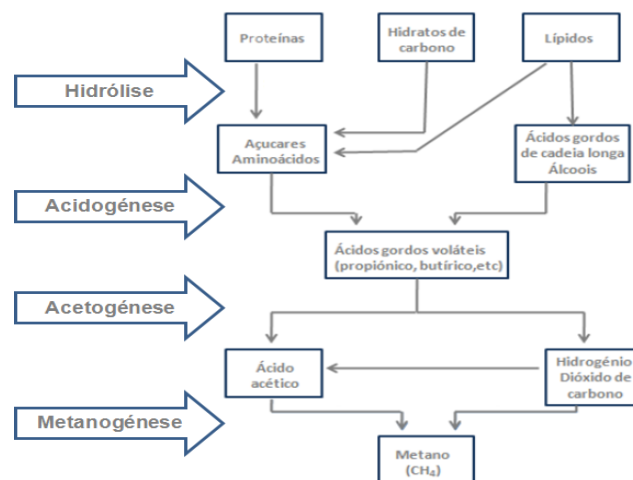


Figura 3.1– Etapas do processo de digestão anaeróbia (adaptado de CCE, 2000)

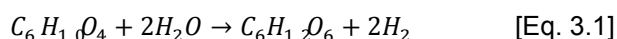
Nestas quatro etapas, as quais se explicam seguidamente, estão envolvidos diferentes grupos de bactérias anaeróbias obrigatórias ou facultativas: as fermentativas, as acetogénicas e as metanogénicas. As bactérias fermentativas estão envolvidas na hidrólise e na acidogénese e as acetogénicas e metanogénicas, na acetogénese e na metanogénese, respectivamente (Geraldi, 2003).

Cada grupo de bactérias intervenientes no processo de digestão anaeróbia “funciona” em sequência, ou seja, os produtos de uns grupos funcionam como substrato para os grupos seguintes.

### 3.1. Hidrólise

A hidrólise consiste na quebra e simplificação de compostos com elevado peso molecular, como as proteínas, os lípidos e os glúcidos, em substâncias orgânicas solúveis (monómeros) como os aminoácidos, os açúcares, e os ácidos gordos de cadeia longa, entre outros. Esta reacção é catalisada por exo-enzimas como proteases, celulasas e lipases, as quais são segregadas pelas bactérias fermentativas (Ralph, Dong, 2010).

A hidrólise dos bio-resíduos alimentares pode ser ilustrada através da seguinte reacção (Ostrem, Nickolas, 2004):



As bactérias fermentativas, envolvidas nesta etapa e na seguinte, representam cerca de 90% da população bacteriana de um digestor anaeróbio (Zeikus, 1980). Diversos estudos permitiram evidenciar, que a maioria das bactérias fermentativas são anaeróbias obrigatórias, existindo algumas, no entanto, que são anaeróbias facultativas (Alves, 1998).

No caso dos resíduos sólidos serem constituídos por celulose, proteínas, lenhina e lípidos, a hidrólise ocorrerá de uma forma mais lenta, o que poderá levar à não formação de monómeros suficientes para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pelas restantes etapas da digestão anaeróbia (Mata-Alvarez *et al.*, 2000).

Quando os resíduos sólidos são constituídos por matéria orgânica pobre em celulose, logo mais facilmente biodegradável, como é o caso dos bio-resíduos alimentares, segundo diversos autores (Cousiño, 2007; Banks, 2008; Neves, 2009), a hidrólise ocorre de uma forma mais rápida, sendo o processo de digestão anaeróbia limitado pela etapa da metanogénese, caso se verifique a acumulação de ácidos gordos voláteis (Bouallagui *et al.*, 2005).

### 3.2. Acidogénese

Os monómeros resultantes da hidrólise servem de substrato ao processo fermentativo da acidogénese. Estes monómeros são transportados até ao interior das bactérias anaeróbias

fermentativas, onde ocorre a formação de ácidos gordos voláteis como o ácido propiónico, butírico, valérico e, em menores concentrações, dióxido de carbono, acetato e hidrogénio (CCE, 2000).

### 3.3. Acetogénese

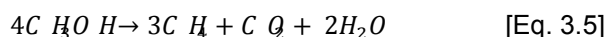
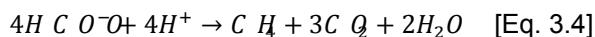
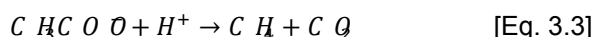
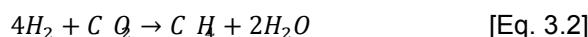
A acetogénese, que constitui a terceira etapa do processo de digestão anaeróbia, consiste na transformação dos produtos da acidogénese (ácidos gordos voláteis) em ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ou acetato, dióxido de carbono e hidrogénio (Pires, 2007).

Existem dois tipos de bactérias intervenientes nesta etapa:

- Bactérias acetogénicas produtoras obrigatórias de hidrogénio – também designadas por bactérias sintróficas, promovem a oxidação anaeróbia dos ácidos gordos voláteis a acetato, através da utilização de diversos tipos de substratos, nomeadamente o etanol, ácido propiónico ou ácido butírico (CCE, 2000). Estas bactérias são muito sensíveis à concentração de hidrogénio existente no meio;
- Bactérias acetogénicas utilizadoras de hidrogénio – estas bactérias produtoras de acetato, são também denominadas por bactérias homoacetogénicas, encontrando-se em pequeno número no digestor anaeróbio. Estas produzem entre 2 a 5% de todo o acetato produzido durante o processo de digestão anaeróbia, através do consumo de hidrogénio e dióxido de carbono (Alves, 1998).

### 3.4. Metanogénese

A metanogénese constitui a última etapa do processo de digestão anaeróbia e nesta ocorre a produção de metano a partir do ácido acético, do hidrogénio e dióxido de carbono (Amaral, 1997). As equações seguintes traduzem algumas das transformações que ocorrem nesta etapa (Alves, 1998):



Das diversas etapas, a metanogénese é a etapa mais limitante da velocidade com que o processo de digestão anaeróbia ocorre (Haandel, Lettinga, 1994). As bactérias que participam na metanogénese pertencem ao reino das *Arqueobactérias*.

Existem mais de 65 espécies destas bactérias que possuem uma velocidade de crescimento cinco vezes inferior à das bactérias acetogénicas (CCE, 2000). As bactérias metanogénicas são anaeróbias estritas, requerem um potencial redox entre -250 e -300 mV e degradam um número

limitado de substratos com baixo número de átomos de carbono como sejam o ácido acético, o metanol, as metilaminas, o formato e o hidrogénio (Wolfe, 1992). Existem dois tipos principais de bactérias metanogénicas:

- Bactérias metanogénicas hidrogenofílicas – produzem metano, através do  $\text{CO}_2$  e do hidrogénio. Estas são responsáveis por aproximadamente 30% do metano produzido na digestão anaeróbia, devido às reduzidas quantidades de hidrogénio no interior de um digestor anaeróbio (Geraldí, 2003);
- Bactérias metanogénicas acetoclásticas – são as principais produtoras de metano, num digestor anaeróbio, produzindo aproximadamente 70% do metano, através da remoção de ácido acético. Estas bactérias, ao consumirem o ácido acético e libertarem metano e  $\text{CO}_2$ , contribuem para a diminuição da acidez do digestor (CCE, 2000).

As bactérias metanogénicas acetoclásticas constituem um dos grupos de bactérias que possui a menor resistência a alterações do meio, tais como choques orgânicos e presença de substâncias tóxicas (Coates, Coughlan, Colleran, 1996).

## 4. Parâmetros de reacção

### 4.1. Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros que mais influencia a eficiência do processo de digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia pode ocorrer em gamas de temperatura muito diferentes, dado que existem diferentes bactérias intervenientes em cada uma das fases do processo de digestão anaeróbia que possuem diferentes óptimos de temperatura. O processo de digestão anaeróbia pode ocorrer entre os 2 e 70°C (Nozhevnikova, Chudina, 1985), mas existem maiores rendimentos de produção de biogás em torno dos 18°C, 37°C e 55°C. Contudo, a velocidade máxima das reacções anaeróbias aumenta com o aumento da temperatura, tal como se apresenta na Figura 4.1 (Kossmann *et al.*, 1997).

Estima-se que por cada 10°C de aumento da temperatura, a velocidade da reacção aumenta 2 a 3 vezes. Habitualmente, a digestão anaeróbia é classificada em função de três gamas de temperatura, tal como se indica no Quadro 4.1.

Quadro 4.1– Gamas de temperatura do processo de digestão anaeróbia (Coates, 1991)

Gama de Temperatura	Temperatura do Processo
Psicrofílica	< 20°C
Mesofílica	30 - 42°C
Termofílica	43 - 55°C

Apesar de existirem três gamas de temperatura para a digestão anaeróbia, as duas gamas mais usadas em processos antropogénicos de digestão anaeróbia são a gama mesofílica e a gama termofílica, dado que são as que apresentam uma maior velocidade de reacção. Na gama mesofílica, a reacção ocorre a uma velocidade maior entre os 30 e 38 °C e na gama termofílica, entre os 50 e 55°C (Figura 4.1).

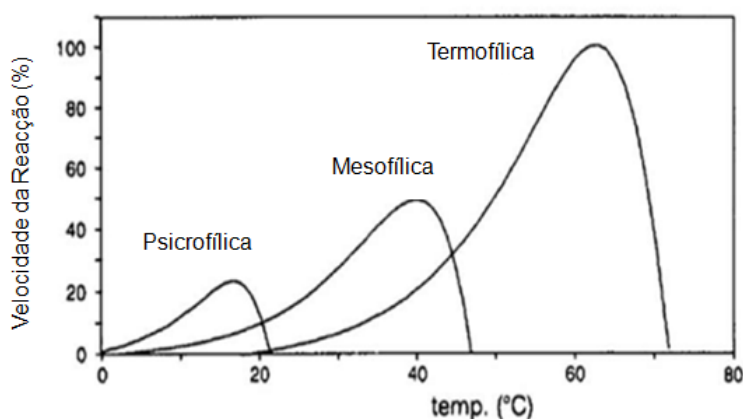


Figura 4.1– Gama de temperatura e velocidade da reacção (adaptado de Angelidaki, Ahring, 1995)

No Quadro 4.2 apresentam-se com as principais vantagens e desvantagens das três gamas de temperatura em que o processo de digestão anaeróbia pode ocorrer.

Quadro 4.2 – Principais vantagens e desvantagens de cada gama de temperaturas

Gama de Temperatura	Vantagens	Desvantagens
<b>Psicrofílica</b>	Em geral, não requer sistemas de aquecimento.	Elevado tempo de retenção hidráulico (Coates, 1991).
		Baixo rendimento na produção de biogás (Coates, 1991).
		Dificuldades no <i>start-up</i> dos digestores, devido à reduzida velocidade de crescimento das bactérias (Pires, 2007).
<b>Mesofílica</b>	Biomassa, constituída por microrganismos que toleram grandes alterações no meio (Arsova, 2010).	Maior tempo de retenção hidráulico e menor produção de biogás quando comparado com a gama termofílica (Arsova, 2010).
	Por norma estes sistemas são mais fáceis e mais baratos de construir e operar, quando comparados com os sistemas que operam em regime termofílico (Arsova, 2010).	
<b>Termofílica</b>	Aumento da velocidade das reacções bioquímicas e das taxas de crescimento dos microrganismos (Gavala <i>et al.</i> , 2003).	Maiores gastos energéticos derivados do aquecimento do digestor anaeróbio (Henze, Arremões, 1983).
	Maior potencial metanogénico associado a menores tempos de retenção hidráulico (Gavala <i>et al.</i> , 2003).	
	A produção de biogás pode ser 25% a 50% superior aos valores registados nas condições óptimas do regime mesofílico (Gavala <i>et al.</i> , 2003).	Microrganismos mais sensíveis às alterações do meio, dado que, a temperaturas elevadas, a lise celular ocorre rapidamente e existe uma maior sensibilidade a variações na carga orgânica ou à presença de tóxicos e de substâncias inibidoras como a amónia livre, que faz com que o processo fique instável (Parkin, Owen, 1986).

Diferentes gamas de temperatura possuem bactérias distintas que intervêm em cada uma das etapas, sendo que, deste modo, alterações bruscas na temperatura afectam o processo de digestão anaeróbia, devido ao facto de não possibilitarem o desenvolvimento de outras bactérias mais adaptadas à nova gama de temperatura. No quadro 4.3 são apresentadas as flutuações máximas aceitáveis de temperatura, para cada gama de temperatura, sem que ocorra um prejuízo significativo na população anaeróbia.

Quadro 4.3 - Variações máximas de temperatura por gama de temperatura (Kossmann *et al.*, 1997)

Gama de Temperaturas	Variações máximas de Temperatura
Psicrofílica	$\pm 2^{\circ}\text{C.h}^{-1}$
Mesofílica	$\pm 1^{\circ}\text{C.h}^{-1}$
Termofílica	$\pm 0,5^{\circ}\text{C.h}^{-1}$

## 4.2. pH

O pH é um parâmetro que afecta a taxa de crescimento dos microrganismos, pois influencia a utilização das fontes de carbono, as reacções de síntese e a produção de metabolitos extracelulares (Sakharova, 1976). O pH influencia ainda a morfologia e a estrutura das bactérias, afectando assim

os fenómenos de adesão e floculação (Alves, 1998). Devido à importância do pH para as bactérias, este constitui um primeiro indicador para o equilíbrio e estabilidade do processo de digestão anaeróbia (Ostrem, Nickolas, 2004).

Uma das principais causas de falha do processo de digestão anaeróbia resulta da acidificação do digestor anaeróbio, provocada pela acumulação de ácidos gordos voláteis, subproduto das bactérias acidogénicas (Alves, 1998).

Cada grupo de microrganismos intervenientes no processo de digestão anaeróbia apresenta uma gama óptima de pH para o seu desenvolvimento. No entanto, pode considerar-se que o processo de digestão anaeróbia deve ocorrer entre os 5,5 e os 8,5 (Ostrem, Nickolas, 2004).

As bactérias acidogénicas suportam variações do pH entre os 4,0 e os 8,5 (CCE, 2000). Já as bactérias metanogénicas são especialmente sensíveis às variações no pH, apresentando uma gama óptima de pH entre os 6,6 e os 7,6 (Alves, 1998), ficando inibidas para valores de pH inferiores a 5,5 (Monte, 2010; Pires, 2007). Sendo estas bactérias as responsáveis pela cinética global do processo de digestão anaeróbia, considera-se a gama óptima de pH destas bactérias a apropriada para o funcionamento do processo de digestão anaeróbia.

Devido a estes dois grupos de microrganismos possuírem diferentes necessidades no que diz respeito ao pH e devido à sua importância, opta-se, em algumas unidades de digestão anaeróbia, por se realizar o processo de digestão anaeróbia em dois digestores anaeróbios distintos (processo a duas etapas). No primeiro digestor ocorre a hidrólise e a acidogénese, estando o pH neste digestor entre os 5,5 e 6,0, que corresponde ao pH óptimo para estas bactérias (CCE, 2000). No segundo digestor são criadas as condições favoráveis para as bactérias metanogénicas (pH entre 6,6 e 7,6).

### **4.3. Nutrientes**

#### **Macro-Nutrientes e Razão C/N**

Os microrganismos presentes no processo de digestão anaeróbia, assim como todos os organismos vivos, necessitam de diversos nutrientes para que os seus processos celulares possam ocorrer.

Os nutrientes que se encontram presentes em concentrações mais elevadas no processo de digestão anaeróbia são os seguintes: carbono, hidrogénio, oxigénio, azoto, enxofre, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Entre estes, o carbono (C), o azoto (N) e, consequentemente, a sua proporção (razão) são um importante indicador para o controlo do processo de digestão anaeróbia (Seadi *et al.*, 2008). Para que o processo de digestão anaeróbia ocorra, a razão C/N tem de se situar entre 15-30. Para diversos autores o valor ideal é de 25 (Monnet, 2003).

Uma razão C/N baixa indica um elevado teor de azoto no processo de digestão anaeróbia, que leva a uma acumulação de amónia e a um consequente aumento do pH para valores superiores a 8,5

que são letais para as bactérias metanogénicas (Verma, 2002). Uma razão C/N elevada é indicadora de uma elevada presença de carbono e de escassez de azoto, que leva a um rápido consumo do azoto disponível por parte das bactérias metanogénicas, resultando numa diminuição na produção de biogás.

A razão C/N é directamente afectada pelos resíduos que entram no processo de digestão anaeróbia, pelo que o seu valor ideal pode ser mantido através da mistura entre resíduos que possuam uma elevada e uma baixa razão C/N (Verma, 2002).

Outro macronutriente essencial para o processo de digestão anaeróbia é o enxofre, pois está envolvido na síntese de aminoácidos e é um dos elementos presentes na co-enzima M que está envolvida nas reacções metanogénicas (Alves, 1998). Contudo, este nutriente não deverá estar presente em excesso na matéria que é introduzida num digestor, pois, caso contrário, promoverá o aumento das bactérias redutoras do enxofre e causará o aumento do ácido sulfídrico no biogás.

O fósforo está envolvido na formação de ácidos nucleicos, fósfolípidos e ATP (Prescott *et al.*, 1996). A razão C/P deverá ser de 150/1 (CCE, 2000).

Finalmente, o potássio, o cálcio e o magnésio estão envolvidos na formação de complexos metálicos e actuam ainda como co-factores para a actividade enzimática.

### **Micronutrientes**

Os Micronutrientes são nutrientes que se encontram presentes no processo de digestão anaeróbia em concentrações inferiores a  $1 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$ . Alguns dos micronutrientes que se encontram presentes no processo de digestão anaeróbia são os seguintes: ferro, molibdénio, zinco, cobalto, selénio, tungsténio e níquel. O ferro, o níquel e o cobalto são micronutrientes essenciais ao processo de digestão anaeróbia para se obter uma elevada conversão de acetato em metano (Alves, 1998).

Embora essenciais ao processo de digestão anaeróbia, os micronutrientes, quando presentes em baixas ou elevadas concentrações, resultam em condições de inibição para a actividade microbiana e em problemas para o processo de digestão anaeróbia (CCE, 2000).

#### **4.4. Substâncias inibidoras ou tóxicas**

As substâncias inibidoras ou tóxicas para os microrganismos intervenientes no processo de digestão anaeróbia ou são formadas no decorrer do processo, ou são transportados para o processo juntamente com a matéria orgânica a tratar. Estas substâncias afectam os microrganismos inibindo os seus processos. Algumas das substâncias inibidoras ou tóxicas para os microrganismos do processo de digestão anaeróbia são: ácidos gordos voláteis, amoníaco, sulfuretos, metais pesados e oxigénio.



### Ácidos Gordos Voláteis

A estabilidade do processo de digestão anaeróbia está directamente relacionada com a concentração de Ácidos Gordos Voláteis (AGV) (Seadi *et al.*, 2008). Como foi mencionado anteriormente, os AGV são subprodutos formados no decorrer do processo de digestão anaeróbia, mais precisamente durante a acidogénese. Alguns exemplos de AGV são o Acetato, Propionato, Butirato e o Lactato.

A instabilidade do processo de digestão anaeróbia, que decorre de variações na Carga Orgânica, leva à acumulação de AGV e à consequente acidificação do processo (Seadi *et al.*, 2008). Nem sempre esta última afirmação se verifica, pois pode ocorrer o caso em que o substrato que entra no processo de digestão anaeróbia seja muito alcalino (Seadi *et al.*, 2008). Nestas circunstâncias, o substrato orgânico apresenta uma forte capacidade de neutralizar a acidez do meio. Para que o processo de digestão anaeróbia ocorra eficazmente, a concentração de AGV deve ser inferior a 2,0 g de acetato.L<sup>-1</sup> (Mcarty *et al.*, 1961).

A digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares regista, segundo diversos autores, uma elevada tendência para a acumulação de AGV, devido à elevada biodegradabilidade deste tipo de resíduos, que levam a que a etapa da acidogénese ocorra de uma forma rápida (Cousiño, 2007; Banks, 2008; Neves, 2009). A concentração de AGV é um parâmetro que deve ser usado na monitorização do processo da digestão anaeróbia em conjunto com alguns dos parâmetros que se indicam seguidamente (Seadi *et al.*, 2008).

### Amoníaco

O Amoníaco (NH<sub>3</sub>) é um importante composto para o processo de digestão anaeróbia. Este composto, quando presente em concentrações superiores a 80mg.L<sup>-1</sup>, inibe maioritariamente a actividade das bactérias metanogénicas, afectando assim o rendimento do processo de digestão anaeróbia (Seadi *et al.*, 2008). As bactérias acetogénicas são mais tolerantes à presença de amoníaco do que as bactérias metanogénicas (Appels *et al.*, 2008). A concentração de Amoníaco é directamente proporcional à temperatura, ou seja quanto maior for a temperatura, maior é a concentração de Amoníaco, pelo que o regime termofílico é mais susceptível à inibição por Amoníaco que o regime mesofílico (Seadi *et al.*, 2008).

### Sulfuretos

Concentrações excessivas de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) e sulfitos (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) nos resíduos que dão entrada no processo de digestão anaeróbia levam ao desenvolvimento das bactérias sulfato-redutoras. Estas bactérias produzem sulfuretos o que, em condições de pH inferior a 6,5, originam gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Este gás, também conhecido por sulfureto de hidrogénio, para além de ser tóxico em concentrações superiores a 100 mg.L<sup>-1</sup> e potencialmente corrosivo, precipita ainda metais essenciais tais como ferro, níquel e cobalto, reduzindo assim a sua disponibilidade no meio (Alves, 1998).

### **Metais pesados**

Alguns metais pesados, se presentes em elevadas concentrações, podem inibir os microrganismos anaeróbios. O cádmio e o cobre são os metais pesados mais tóxicos para os microrganismos anaeróbios; o níquel e o chumbo são os menos tóxicos (Lin, 1992). O alumínio pode ser tolerado pelas bactérias anaeróbias, sem levar à inibição, até concentrações de 2500 mg.L<sup>-1</sup> (Jackson, Duncan, 1991).

### **Oxigénio**

A tolerância ao oxigénio molecular, na forma dissolvida, pelas bactérias metanogénicas, varia de espécie para espécie. No entanto, considera-se que toleram geralmente um teor de oxigénio que permita atingir potenciais de oxidação-redução inferiores a -200 mV (Appels *et al.*, 2008).

## 5. Parâmetros Operacionais

### 5.1. Carga Orgânica

A Carga Orgânica constitui um importante indicador operacional pois está associada à capacidade de conversão biológica da unidade de digestão anaeróbia (Arsova, 2010). A Carga Orgânica representa a quantidade máxima de matéria orgânica que pode dar entrada no processo de digestão anaeróbia, num determinado intervalo de tempo, sem que ocorra o fenómeno de inibição do processo, decorrente da acumulação de AGV. Este fenómeno é explicado na Figura 5.1.

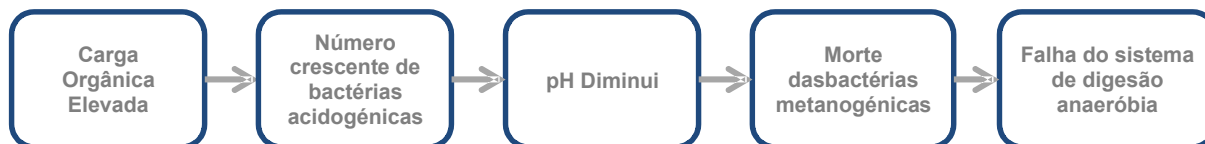


Figura 5.1 – Esquema explicativo do processo de inibição da digestão anaeróbia devido a uma elevada carga orgânica (adaptado de Arsova, 2010)

No cálculo da carga orgânica, a matéria orgânica pode ser expressa em Sólidos Voláteis (SV), Sólidos Totais (ST), Carência Química de Oxigénio (CQO) ou Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO) (Riuji, 2009). A Carga Orgânica pode ser calculada através da seguinte equação (Seadi *et al.*, 2008):

$$C_v = \frac{Q \times C}{V} \quad [\text{Eq. 5.1}]$$

**Legenda:**

$C_v$  – Carga orgânica ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$Q$  – Caudal afluente ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ );

$C$  – Concentração da matéria orgânica ( $\text{kg} / \text{m}^3$ );

$V$  – Volume do digestor ( $\text{m}^3$ ).

Para que a digestão anaeróbia ocorra de uma forma estável, a carga orgânica específica de sólidos voláteis deve ser inferior a  $9 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$  (Cecchi *et al.*, 1986; Mata-Alvarez *et al.*, 2000). No entanto, as unidades de digestão anaeróbia criadas para valorizarem resíduos sólidos com elevado teor de sólidos (*via seca*), tal como as que são apresentadas na secção 8 da presente dissertação, suportam cargas orgânicas superiores a  $9 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$  (Pavan *et al.*, 1994; Banks, 2008). A título de exemplo, os digestores anaeróbios do tipo DRANCO suportam uma carga orgânica de  $14,9 \text{ kg SV} / \text{m}^3 \cdot \text{dia}$  (Baere, 2007; Santos, 2010).

### 5.2. Tempo de Retenção Hidráulico

O Tempo de Retenção Hidráulico (TRH) constitui o tempo médio de permanência dos resíduos no interior do digestor anaeróbio. Este parâmetro é muito importante aquando do dimensionamento do digestor anaeróbio e durante a operação do mesmo, dado que influencia directamente o processo de digestão anaeróbia.

O TRH pode ser calculado de acordo com a seguinte equação (adaptado de Seadi *et al.* 2008):

$$TRH = \frac{V_R}{C} \quad [\text{Eq. 5.2}]$$

TRH – Tempo de Retenção Hidráulico (dias);

$V_R$  – Volume do digestor anaeróbio ( $\text{m}^3$ );

$C$  – Caudal de entrada de substrato no digestor anaeróbio ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ).

Um TRH reduzido leva a uma diminuição na produção de biogás e a um aumento do material por digerir na saída do digestor (Seadi *et al.* 2008), mas também a uma redução do custo inicial da unidade de digestão anaeróbia, por necessitar de digestores de menor dimensão (Ostrem, Nickolas, 2004). Com o intuito de se alcançar uma unidade de digestão anaeróbia o mais economicamente viável, tem de se alcançar um equilíbrio entre estas variáveis: produção de biogás e dimensão do digestor. Quanto maior for o tempo que os resíduos permanecem no interior do digestor em condições adequadas, maior será a sua degradação e consequentemente maior será também a produção de biogás. No entanto, à medida que aumenta o TRH, a velocidade da reacção decresce e, consequentemente, diminui igualmente a taxa de produção de biogás, como fica patente na Figura 5.2.

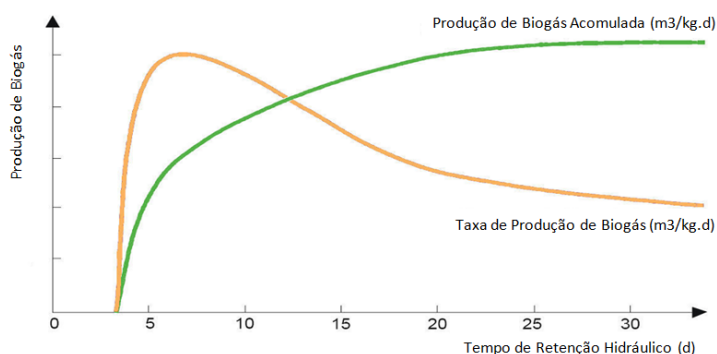


Figura 5.2 – Produção de biogás em função do Tempo de Retenção Hidráulico (adaptado de Bisschops, *et al.*, 2009)

O TRH varia em função do tipo de resíduo a valorizar, das condições de reacção e do tipo de utilização que se pretende para o digerido (Ostrem, Nickolas, 2004). A temperatura, o teor em sólidos e a agitação do digestor anaeróbio são os parâmetros que mais afectam o TRH.

As unidades de digestão anaeróbia, que funcionam em regime mesofílico, possuem tempos de retenção hidráulicos (10-40 dias) superiores às unidades de digestão anaeróbia a funcionarem em regime termofílico (Seadi, *et al.* 2008). A digestão anaeróbia por *via seca*, ou seja que possui substratos com elevados teores de sólidos, possui tempos de retenção hidráulicos entre os 14 e 30 dias, que são superiores aos apresentados pela digestão anaeróbia por *via húmida* (Ostrem, Nickolas, 2004). A agitação do digestor anaeróbio é outro factor que faz reduzir o TRH.

Outro factor que influencia o tempo retenção hidráulico é a carga orgânica. Para uma digestão anaeróbia mesofílica com uma carga orgânica de  $1-4 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$  é proposto um tempo de retenção hidráulico de 14-30 dias e para uma digestão anaeróbia mesofílica com uma carga

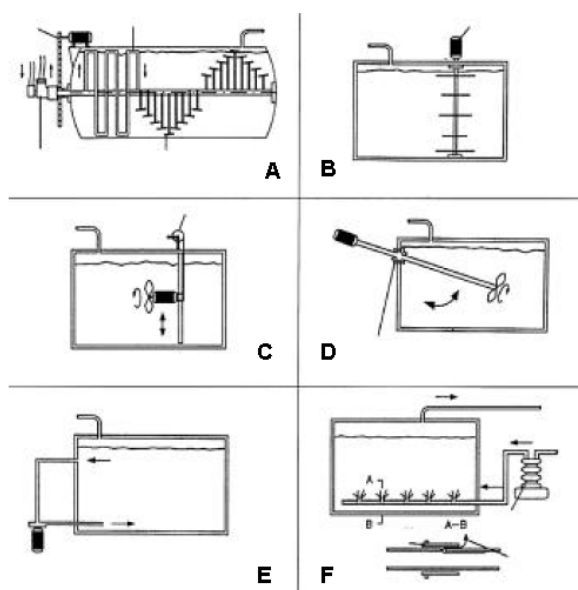
orgânica de 3.8-6.9 kg SV.m<sup>-3</sup>.dia<sup>-1</sup> é proposto um tempo de retenção hidráulico de 20-55 dias (Mata-alvarez *et al.*, 2000; Gyalpo, 2010).

### 5.3. Agitação e mistura do digestor

A agitação do digestor anaeróbio representa um importante aspecto operacional pois contribui para a redução do TRH e para o aumento do rendimento da reacção, uma vez que os microrganismos conseguem aceder de forma mais uniforme a todo o substrato, a temperatura é semelhante em todo o digestor e as bolhas de biogás presas na lama são libertadas mais facilmente (Appels *et al.*, 2008). Para além destes benefícios, um sistema de mistura no digestor anaeróbio possibilita ainda a dissolução de uma camada de material flutuante que se pode formar na parte superior do conteúdo do digestor e evita ainda a formação de sedimentos e a sua acumulação no fundo do mesmo (Kossmann *et al.*, 1997; Wellinger, 1999;)

Existem diversos tipos de sistemas de agitação e mistura do digestor que podem ser agrupados, de uma forma global, em três sistemas diferentes: mecânicos, hidráulicos e de recirculação e injeção de biogás (Wellinger, 1999; Appels *et al.*, 2008).

Os principais tipos de sistemas de agitação encontram-se sistematizados na Figura 5.3.



**Legenda:**

- A – Agitador mecânico de pás horizontal;
- B – Agitador mecânico de pás vertical;
- C – Agitador mecânico de hélice ajustável;
- D – Agitador mecânico de hélice instalado num eixo rotativo;
- E – Agitador de recirculação de digerido;
- F – Agitador de recirculação e injeção de biogás.

Figura 5.3 – Principais tipos de sistemas de agitação e mistura existentes em digestores anaeróbios (Wellinger, 1999)

A potência aplicada ao sistema de mistura varia em função da dimensão, da forma do digestor e do tipo de resíduo a valorizar, podendo variar entre 10 a 100 Wh.m<sup>-3</sup>.dia<sup>-1</sup>.

Os agitadores mecânicos são os mais frequentemente utilizados, devido à sua robustez e eficiência (Wellinger, 1999).

Na digestão anaeróbia de um substrato com um elevado teor de sólidos totais - *via seca*, o sistema de agitação e mistura do digestor a empregar é de elevada complexidade e muito dispendioso, devido ao elevado teor de sólidos totais (Hilkiah *et al.*, 2008).

#### **5.4. Sistema de Aquecimento de um Digestor**

A temperatura no interior do digestor pode variar devido a diversos aspectos (Seadi *et al.*, 2008):

- Adição de resíduos ao digestor, que se encontrem a uma temperatura diferente da que está o digestor;
- Formação de camadas de temperatura ou de zonas insuficientemente aquecidas devido a isolamento insuficiente do digestor anaeróbio, incorrecto ou ineficiente dimensionamento do sistema de aquecimento e ineficiente agitação do digestor;
- Temperaturas exteriores extremas.

Com o intuito de atingir uma temperatura estável no interior do digestor e de se evitar a perda de calor, o digestor anaeróbio tem de possuir um correcto isolamento e um sistema de aquecimento.

O sistema de aquecimento pode incidir no processo de alimentação de resíduos ao digestor (pré-aquecimento de resíduos) através de aquecedores e pode ser colocado no interior do digestor com a colocação de elementos aquecidos no seu interior como tubagens, nas quais circula vapor ou um líquido aquecido (Seadi *et al.*, 2008). Diversas unidades de digestão anaeróbia usam o segundo sistema para aquecimento do interior do digestor, mas recorrem também ao primeiro sistema, uma vez que o pré-aquecimento dos resíduos apresenta a vantagem de não provocar qualquer tipo de flutuação na temperatura interna do digestor anaeróbio, aquando da alimentação dos resíduos (Seadi *et al.*, 2008).

## 6. Digestores Anaeróbios

### 6.1. Caracterização geral

A peça central de uma unidade de digestão anaeróbia é o reactor, também designado por digestor ou digestor anaeróbio. Neste ocorre a decomposição da matéria orgânica (substrato) e a produção de biogás, na ausência de oxigénio molecular. Uma característica comum a todos os digestores anaeróbios, independentemente das condições de operação da sua dimensão e do resíduo que valorizam, é o facto de possuírem sistemas que permitem que o substrato entre no digestor e que o biogás e o digerido saíam do mesmo (Monnet, 2003). A par desta característica, todos os digestores anaeróbios têm de atender aos seguintes requisitos, independentemente da dimensão, do tipo de resíduo a valorizar e das condições de operação (Kossmann *et al.*, 1997):

- **Estanquicidade** – Com o intuito de prevenir fugas de líquidos e de biogás;
- **Isolamento térmico** – O qual depende das condições de operação do digestor e do clima local. No entanto, independentemente destes factores, todos os digestores anaeróbios deverão ser construídos com o intuito de maximizar o seu isolamento térmico, minimizando desta forma as perdas de calor para o exterior;
- **Área superficial mínima** – Quanto menor for a área de superfície de um digestor anaeróbio, menor serão as perdas de calor para o exterior. Atendendo a este requisito, um digestor anaeróbio com uma forma esférica é o que possui a melhor razão entre o seu volume e a sua área superficial. No entanto, um digestor anaeróbio com uma estrutura hemisférica, tanto na base como na cobertura, aproxima-se da forma ideal para minimizar a área superficial;
- **Estabilidade Estrutural** – Suficiente para suportar cargas estáticas e dinâmicas e ainda ser durável e resistente à corrosão.

Existem diversos tipos de digestores anaeróbios em operação na Europa e no Mundo. Os digestores podem ser construídos cimento, metal, alvenaria e plástico. Podem ser colocados à superfície ou no subsolo e podem assumir diversas formas como silos, calhas, bacias ou lagoas (Monnet, 2003). A dimensão da unidade de digestão anaeróbia é dada em função da capacidade do digestor anaeróbio, que pode possuir desde poucos metros cúbicos, no caso de pequenas instalações familiares e descentralizadas, a instalações centralizadas com digestores de diversos milhares de metros cúbicos de capacidade, como ocorre no caso de instalações comerciais.

A Figura 6.1 ilustra quais os principais aspectos a ter em consideração no processo de escolha do digestor anaeróbio.

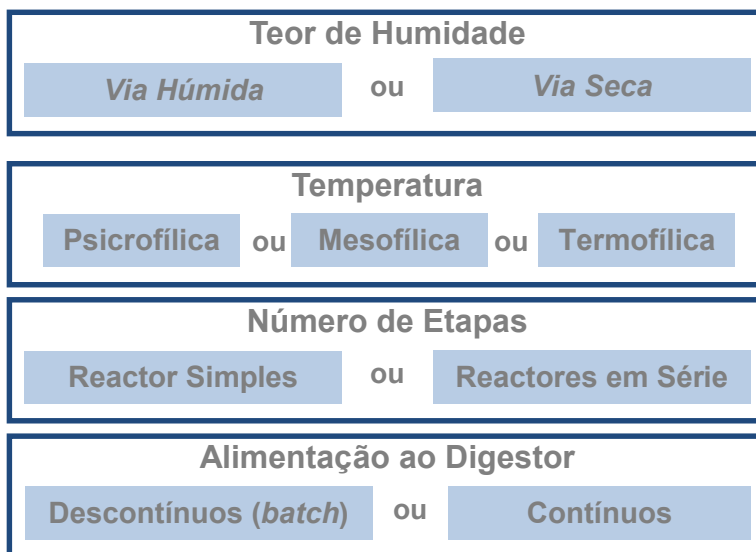


Figura 6.1 – Aspectos a ter em consideração na escolha do digestor anaeróbio (adaptado de Bisschops, *et al.*, 2009)

## 6.2. Teor de humidade

Como se indica na Figura 6.1., o primeiro aspecto a ter em conta na escolha do digestor anaeróbio é o teor de humidade, dado que influencia o tipo de digestão, o *design* do digestor e de toda a unidade de digestão anaeróbia (Monnet, 2003). Existem dois tipos de digestão anaeróbia relativamente ao teor de humidade: a digestão anaeróbia por *via húmida* e por *via seca*. O que distingue estes dois tipos de digestão anaeróbia é o teor em sólidos totais do substrato, que na digestão anaeróbia por *via húmida* é inferior a 15% e na digestão anaeróbia por *via seca* está entre os 20 e os 40% (Ostrem, Nickolas, 2004).

O Quadro 6.1 ilustra alguns dos resíduos habitualmente usados na digestão anaeróbia por *via húmida* e por *via seca*.

Quadro 6.1 – Exemplos de resíduos usados na digestão anaeróbia, em função do teor de humidade (Monnet, 2003).

Teor de Humidade do Substrato	Exemplos de resíduos
<i>Via Húmida</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Lamas de ETAR;</li> <li>➤ Estrume;</li> <li>➤ Chorumes.</li> </ul>
<i>Via Seca</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Resíduos orgânicos domésticos;</li> <li>➤ Dejectos de animais, com elevado teor em palhas;</li> <li>➤ Resíduos verdes não lenhosos.</li> </ul>



O Quadro 6.2 sintetiza as principais vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia por *via seca* e por *via húmida*.

Quadro 6.2 - Principais vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia por *via seca* e por *via húmida* (Seadi *et al.*, 2008)

Teor de Humidade do Substrato	Vantagens	Desvantagens
<i>Via Húmida</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Custo mais reduzido dos equipamentos;</li> <li>➤ Maior robustez dos equipamentos e menor susceptibilidade à ocorrência de entupimentos e bloqueios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Menor produção de biogás quando comparada com a digestão anaeróbia por <i>via seca</i>;</li> <li>➤ Necessidade de maior espaço para instalar a unidade, devido aos volumes superiores com que a mesma opera.</li> </ul>
<i>Via Seca</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Maior rendimento na produção de biogás;</li> <li>➤ Equipamentos mais compactos necessitando de um menor espaço.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Equipamentos mais complexos, dispendiosos e de operação mais difícil;</li> <li>➤ Maior susceptibilidade à ocorrência de bloqueios, entupimentos e falhas no processo de digestão anaeróbia.</li> </ul>

### 6.3. Alimentação ao Digestor

Quanto ao modo de alimentação e de extracção dos resíduos digeridos, os digestores anaeróbios são classificados como descontínuos (*batch*) ou contínuos.

Os digestores anaeróbios em *batch* são alimentados com um volume de substrato, sendo este digerido e, posteriormente, completamente removido do digestor. Após ter completado um ciclo de digestão, o digestor é novamente alimentado com uma nova porção de substrato e o ciclo é novamente repetido. Os digestores anaeróbios que possuem um método de alimentação em *batch* têm uma construção mais simples e são usados habitualmente para a digestão por *via seca* (Seadi *et al.*, 2008).

Os digestores contínuos são caracterizados por possuírem uma alimentação constante, dado que o substrato introduzido é proporcional à quantidade de resíduo digerido e biogás que saem do digestor (CCE, 2000). Nos digestores anaeróbios contínuos, ao contrário dos que funcionam em *batch*, a produção de biogás ocorre de uma forma constante e previsível, sendo desta forma independente da alimentação de novo substrato e da descarga do digerido (Monnet, 2003).

### 6.4. Número de Etapas

Como foi mencionado na secção 4, atendendo às especificidades do processo de digestão anaeróbia, existem vantagens em separar por diversas etapas o processo de digestão anaeróbia. Esta separação por etapas ocorre através da instalação de dois ou mais digestores anaeróbios que funcionam em série.

Num reactor simples, todas as reacções ocorrem num único digestor anaeróbio, sendo as condições da digestão anaeróbias mantidas em níveis toleráveis para todos os microrganismos intervenientes

no processo de digestão anaeróbia. Deste modo, as condições de operação para uma etapa em particular, podem não ser ótimas, mas apenas adequadas.

Quando a digestão anaeróbia ocorre em múltiplos digestores, cada digestor mantém as condições ambientais ótimas para cada grupo de microrganismos intervenientes em cada uma das fases da digestão anaeróbia, possuindo desta forma uma maior eficiência na conversão de substrato em biogás (Monnet, 2003).

## 6.5. Tipologia de digestores

### Digestores anaeróbios contínuos

- **Digestor de mistura completa (CSTR - *continuously stirred tank reactor*)** – Neste tipo de digestores, o substrato é constantemente agitado no interior do mesmo, possibilitando desta forma um contacto mais eficiente entre este e os microrganismos (figura 6.2). Nos digestores CSTR o tempo de retenção de sólidos (TRS), que descreve a razão entre o conteúdo em sólidos totais no reactor e a taxa de perda de sólidos para o efluente, é igual ao tempo de retenção hidráulico (Vandevivere *et al.*, 2001). Geralmente, este tipo de digestores possui tempos de retenção hidráulicos longos que variam entre várias semanas a meses, e parte da população microbiana é removida do digestor através do digerido (Bisschops *et al.*, 2009).

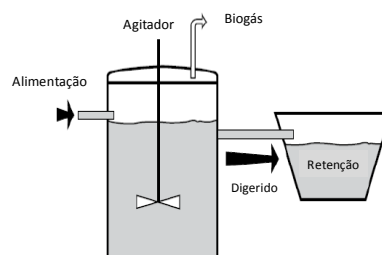


Figura 6.2 – Digestor de mistura completa (adaptado de Bisschops, *et al.*, 2009)

- **Digestor de leito de lamas de fluxo ascendente (UASB – *upflow anaerobic sludge blanket*)** – Este tipo de digestor baseia-se na tendência que a biomassa apresenta para formar agregados densos de tamanho variável, entre 0,1 e 8 mm de diâmetro, que não estão fixos a qualquer tipo de suporte (Figura 6.3). Os grânulos de maior dimensão e velocidade de sedimentação formam um manto de lamas na zona inferior do digestor, enquanto os flocos mais leves e com menor concentração de biomassa se situam na zona superior.

O biogás produzido e alguma biomassa flutuante são separados da fase líquida por intermédio do separador gás-sólido-líquido instalado no topo do digestor (Alves, 1998).

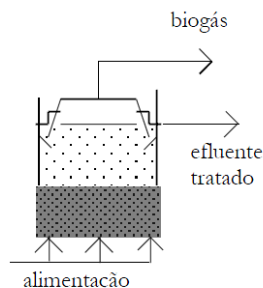


Figura 6.3 - Digestor de leito de lamas de fluxo ascendente (Alves, 1998)

- **Digestor de contacto** – O digestor anaeróbio de contacto, sendo semelhante ao digestor CSTR, possui um sistema adicional que permite separar a fase líquida do digerido e fazer a sua recirculação (Figura 6.4). Esta separação por sedimentação, flotação ou centrifugação, possibilita controlar a perda de biomassa do digestor anaeróbio dado que o efluente recirculado irá actuar como inóculo (Energia, 2005).

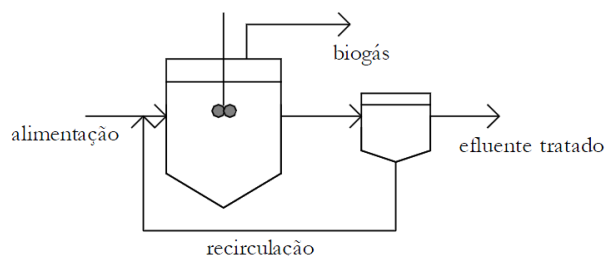


Figura 6.4 - Digestor de contacto (Alves, 1998)

- **Digestor de fluxo pistão (*plug-flow*)** – Este tipo de digestor funciona através da entrada de substrato por uma das extremidades do digestor, o que induz a deslocação de todo o conteúdo do mesmo, culminando com a saída do lado oposto da mesma quantidade de digerido (Figura 6.5). O biogás é recolhido pela parte superior do digestor. Os digestores de fluxo pistão são frequentemente desprovidos de equipamentos de agitação, podendo no entanto possuir um agitador de eixo horizontal. Como resultado do funcionamento do digestor, o mesmo possui material em diferentes fases de degradação no seu interior. O digestor *plug-flow* é especialmente indicado para substratos que possuam uma elevada concentração em sólidos totais (Bisschops *et al.*, 2009).

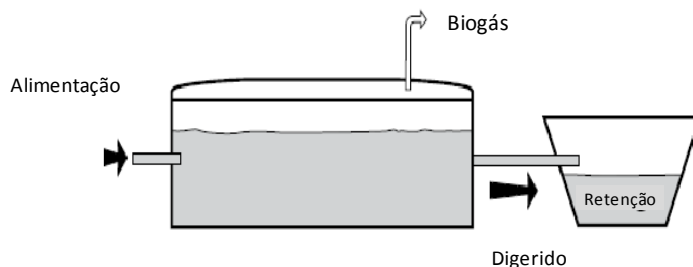


Figura 6.5 - Digestor de fluxo pistão (adaptado de Bisschops *et al.*, 2009)

### Digestores anaeróbios descontínuos (*Batch*)

Existem três tipos de digestores anaeróbios em *Batch*, que se encontram ilustrados na Figura 6.6.

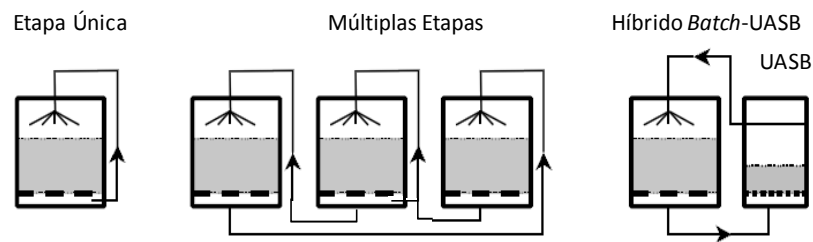


Figura 6.6 - Tipos de digestores anaeróbios descontínuos (adaptado de Vandevivere *et al.*, 2001)

- **Etapa Única** – Neste tipo de digestores ocorre recirculação de digerido do fundo do reator para o seu topo, possibilitando assim um sistema de agitação parcial;
- **Múltiplas Etapas** – É constituída por dois ou mais digestores anaeróbios em *batch*, que funcionam sequencialmente. O digerido do primeiro digestor é recirculado para o terceiro onde ocorre a metanogénese. O digerido deste terceiro digestor, que possui um elevado poder tampão derivado do pH elevado, é recirculado para o segundo e posteriormente para o primeiro digestor, possibilitando assim a estabilização do pH no primeiro e segundo digestores (Monnet, 2003);
- **Híbrido *Batch*-UASB** – Este tipo de digestor anaeróbio *batch* é híbrido, dado que resulta da combinação de um digestor *batch* simples com um digestor UASB. O digestor *batch*, onde ocorre a maior parte da etapa da metanogénese, é alimentado por lamas resultantes do fluxo ascendente do digestor UASB, possibilitando, deste modo, o tratamento dos resíduos com elevado teor de ácidos orgânicos voláteis (Vandevivere *et al.*, 2001).

## 7. Unidades de Digestão Anaeróbia

A tipologia e os equipamentos que compõem uma unidade de digestão anaeróbia variam de país para país, em função das condições climáticas, da legislação, das políticas para a energia e da disponibilidade e acesso à energia (Seadi *et al.*, 2008). Tendo por base a sua dimensão, função e localização, as unidades de digestão anaeróbia podem ser classificadas do seguinte modo (Seadi *et al.*, 2008):

- Unidades de digestão anaeróbia de dimensão familiar (Muito pequena escala);
- Unidades de digestão anaeróbia descentralizadas (Pequena a grande escala);
- Unidades de digestão anaeróbia centralizadas e unidades de co-digestão anaeróbia (Média a grande escala).

### **Unidades de Digestão Anaeróbia de dimensão familiar e descentralizadas Existentes em Muito Pequena e Pequena Escalas**

Em seguida são apresentadas algumas das unidades de digestão anaeróbia em muito pequena e pequena escalas, de dimensão familiar e descentralizadas, mais utilizadas em todo o Mundo. Não se pretende fazer uma listagem exaustiva de todas as unidades existentes, dado existirem diversas configurações com a tecnologia existente, assim como alterações de projecto.

Estes tipos de unidades de digestão anaeróbia são muito usadas em países como a China, a Índia e o Nepal, e produzem biogás que é usado para cozinhar e para a iluminação familiar. Estas unidades usam digestores muito simples e robustos, que necessitam de pouca manutenção e que podem ser construídos com materiais locais (Seadi *et al.*, 2008).

A maior parte destas unidades não dispõe de instrumentos de controlo, nem de aquecimento, funcionando na gama psicrófila ou mesmo na mesófila, dado que a maioria opera em climas quentes, e possuem elevados tempos de retenção hidráulicos (Seadi *et al.*, 2008).

Este tipo de unidades possui capacidade para valorizar diversos tipos de resíduos orgânicos, sendo normalmente usados para valorizar bio-resíduos alimentares, excrementos de animais e mistura destes dois resíduos.

Decorrente da revisão bibliográfica efectuada, não foram encontradas, nos países em desenvolvimento, unidades de digestão anaeróbia e a operarem em muito pequena e pequena escalas, que cumpram com toda a legislação em vigor que regulamenta estas unidades na União Europeia, e que sejam aptas a valorizar única e exclusivamente bio-resíduos alimentares. Relativamente às unidades que cumprem a regulamentação da União Europeia, estas apenas foram encontradas à escala laboratorial e à escala piloto (Hessami *et al.*, 1996; Banks, 2008; Bisschops, *et al.*, 2009; Sadi, 2010).

As unidades de digestão anaeróbia em pequena escala, apresentadas seguidamente, são agrupados em três tipos (Werner *et al.*, 1989):

- De cúpula fixa;
- De cúpula flutuante;
- De saco.

### 7.1. Unidades de Digestão Anaeróbia de Cúpula Fixa

Uma unidade de digestão anaeróbia de cúpula fixa compreende um digestor constituído por uma zona de fermentação, pela cúpula onde o biogás é armazenado e por um tanque de saída. Este digestor funciona com base no princípio da prensa hidráulica, dado que o aumento de pressão resultante da acumulação de biogás na cúpula leva a que o digerido se desloque do digestor para o tanque de saída (Deganutti *et al.*, 1995). De igual forma, quando o biogás é extraído da parte superior da cúpula do digestor uma parte proporcional de digerido, armazenada no tanque de saída, retorna ao digestor (Werner *et al.*, 1989). Neste tipo de unidades de digestão anaeróbia, a pressão do biogás no interior do digestor não permanece constante, aumentando à medida que mais biogás se acumula no interior da cúpula do digestor (Werner *et al.*, 1989).

Os resíduos são valorizados neste tipo de unidades de digestão anaeróbia por *via húmida*, e destes podem constar diversos materiais fibrosos, não lenhosos, em combinação com excrementos de animais ou resíduos alimentares (Werner *et al.*, 1989). A alimentação de substrato a este tipo de unidades de digestão anaeróbia é do tipo contínuo, podendo, no entanto, suportar alguns dias sem ser abastecido, sendo o substrato acumulado abastecido em simultâneo, caso o sistema esteja dimensionado para tal (Werner *et al.*, 1989).

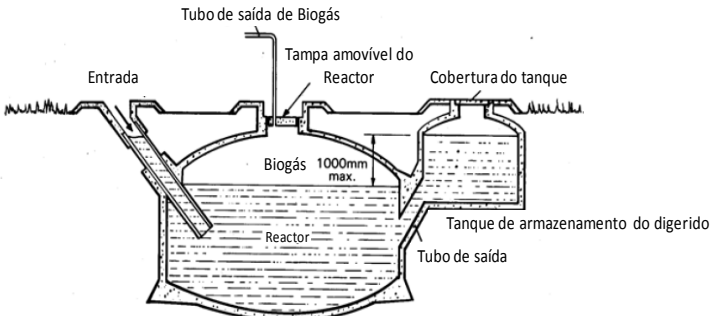
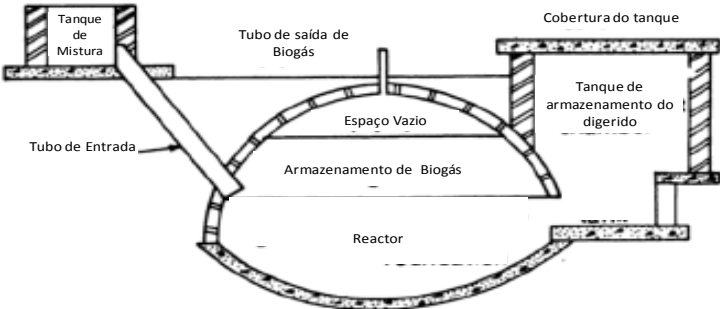
As unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa devem estar enterradas até à parte superior da cúpula do digestor, por razões de segurança. Por norma, o tamanho do digestor deste tipo de unidades não é superior a 20 m<sup>3</sup> (Werner *et al.*, 1989). O Quadro 7.1 sintetiza as principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa.

Quadro 7.1– Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa (adaptado de Werner *et al.*, 1989)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Baixo custo de instalação;</li><li>➤ Período de vida longo;</li><li>➤ Sistema compacto.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Dificuldade de isolamento da cúpula;</li><li>➤ Ocorrência de fendas na cúpula;</li><li>➤ A pressão irregular do gás dificulta a sua utilização;</li><li>➤ Necessita de mão-de-obra especializada para a sua construção.</li></ul>

O Quadro 7.2 sistematiza os principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa existentes em muito pequena e em pequena escala.

Quadro 7.2– Principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula fixa existentes em muito pequena e pequena escala

Modelo Chinês
<p>Construída pela primeira vez na China, em 1936, esta unidade de digestão anaeróbia de cúpula fixa é a mais comumente utilizada em países em desenvolvimento (FAO, 1996). Em 1992 existiam aproximadamente cinco milhões de unidades de digestão do Modelo Chinês, de dimensão familiar, com um volume de 8 e 10 m<sup>3</sup> em operação na China (Marchaim, 1992). Esta unidade de digestão consiste numa única câmara, subterrânea, construída em alvenaria (tijolo) ou betão (Figura 7.1). O modelo chinês elimina o uso de um gasómetro em aço, no topo do digestor, possibilitando uma redução no preço do mesmo, mas potenciando a ocorrência de fugas de biogás do mesmo, constituindo este, um dos maiores problemas deste tipo de unidades (Deganutti <i>et al.</i>, 1995). O Modelo Chinês possui um período de vida útil que pode variar entre os 20 e os 50 anos (FAO, 1996).</p> <p>O teor em sólidos totais do substrato a ser alimentado a esta unidade de digestão deve ser de cerca de 8% (digestão anaeróbia por <i>via húmida</i>) com o intuito de se evitar entupimentos e de se facilitar a circulação do material no interior do digestor (Deganutti <i>et al.</i>, 1995). A Figura 7.1 ilustra a unidade de digestão anaeróbia de cúpula fixa do Modelo Chinês:</p>  <p>Figura 7.1 – Unidade de Digestão anaeróbia do Modelo Chinês (adaptado de Bisschops <i>et al.</i>, 2009)</p>
Tipo Deenbandhu
<p>Variante do Modelo Chinês, esta unidade de digestão anaeróbia, difere do anterior pela cúpula do seu digestor, que é de polietileno (Figura 7.2). Esta cúpula possibilita uma redução no tempo de construção de 3 semanas, para o Modelo Chinês, para 6 dias. A cúpula em polietileno do digestor Deenbandhu dá resposta ao principal problema do Modelo Chinês, evitando as perdas de biogás pela mesma (Bisschops <i>et al.</i>, 2009).</p>  <p>Figura 7.2 - Unidade de Digestão anaeróbia do Tipo Deenbandhu (adaptado de FAO, 1996)</p>

### Tipo Camartec

O modelo de unidade de digestão anaeróbia do tipo Camartec foi desenvolvido nos anos 80, na Tanzânia. O digestor desta unidade é constituída por uma estrutura de cúpula fixa de forma hemisférica que está assente numa base rígida em forma de anel (Figura 7.3).

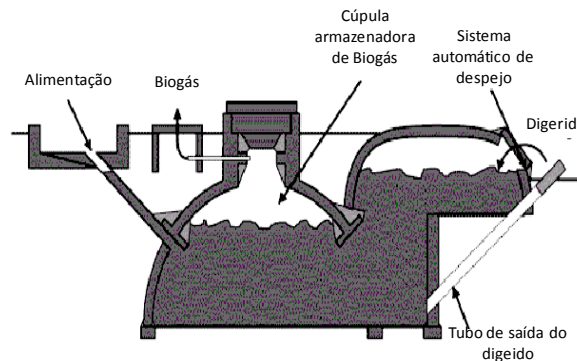


Figura 7.3 - Unidade de Digestão anaeróbia do Tipo Camartec (adaptado de Kossmann *et al.*, 1997)

## 7.2. Unidades de Digestão Anaeróbia de Cúpula Flutuante

Uma unidade de digestão anaeróbia de cúpula flutuante consiste, essencialmente, num digestor cilíndrico e num gasómetro em forma de cúpula ou de tambor flutuante, na parte superior do digestor (Werner *et al.*, 1989). Esta unidade possibilita que a pressão de saída do biogás seja constante, dado que à medida que o biogás vai sendo produzido o mesmo é armazenado na cúpula que se desloca verticalmente, aumentando desta forma o volume de armazenamento e mantendo constante a pressão do biogás (Deganutti *et al.*, 1995). A pressão do biogás é ditada pelo peso que a cúpula possui, logo, caso se pretenda aumentar a pressão do gás, basta colocar peso sobre a cúpula (Marchaim, 1992). Esta unidade possui um tipo de alimentação contínua, sendo muito usado na valorização de dejectos animais e humanos por *via húmida* (Werner *et al.*, 1989).

O digestor desta unidade possui uma capacidade média entre 5 e 15 m<sup>3</sup> para usos descentralizados, podendo atingir os 100 m<sup>3</sup> em instalações industriais centralizadas (Werner *et al.*, 1989).

No Quadro 7.3 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante.

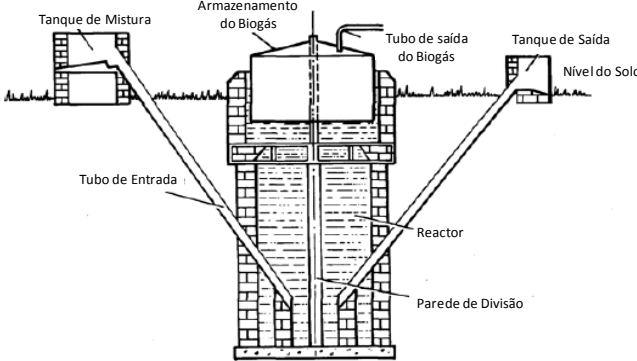
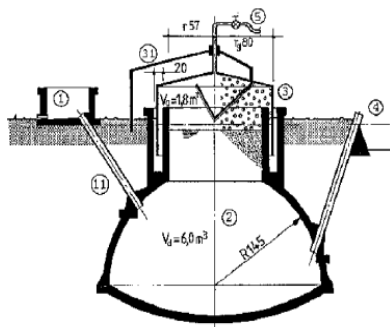
Quadro 7.3 – Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante (adaptado de Werner *et al.*, 1989)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Unidade de fácil operação;</li> <li>➤ Fornece biogás a pressão constante;</li> <li>➤ Volume de biogás armazenado é facilmente perceptível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Manutenção dispendiosa;</li> <li>➤ Resíduos com elevado teor de sólidos, podem fazer com que a cúpula fique “presa”.</li> </ul>



O Quadro 7.4 sistematiza os principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante existentes em muito pequena e pequena escala.

Quadro 7.4 – Principais tipos de unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante existentes em muito pequena e pequena escala

Modelo Indiano
<p>Este tipo de unidades de digestão anaeróbia de cúpula flutuante foi criado na Índia, em 1956, por Jashu Bhai J. Patel. Aprovado e Promovido pelo Khadi and Village Industries Commission (KVIC) da Índia, distribuiu-se de forma rápida por este país e por todo o Mundo e ficou igualmente conhecido por unidade KVIC (FAO, 1996). O digestor do Modelo Indiano é constituído pelo tanque digestor, usualmente construído em alvenaria (tijolo) ou em betão, pela cúpula flutuante, que é construída hoje em dia em fibra de vidro uma vez que as cúpulas, que eram antigamente construídas em metal, eram mais susceptíveis de serem corroídas pelo biogás (Figura 7.4).</p> <p>À semelhança do Modelo Chinês, esta unidade de digestão possui um tipo de alimentação contínua e o teor de sólidos totais do substrato é de cerca de 8% (digestão anaeróbia por <i>via húmida</i>) (Deganutti <i>et al.</i>, 1995).</p>  <p>Figura 7.4 - Unidade de Digestão anaeróbia do Modelo Indiano (adaptado de Bisschops <i>et al.</i>, 2009)</p>
Unidade Water Jacket
<p>A unidade Water Jacket é em tudo semelhante ao Modelo Indiano, com excepção para uma melhoria na cúpula da unidade. No Modelo Indiano a cúpula flutuante está em contacto com o líquido do digestor, o que pode levar a que a cúpula fique presa devido a partículas em suspensão num substrato com um elevado teor de sólidos. Na unidade Water Jacket, a cúpula flutuante não está em contacto com o líquido do digestor mas sim com uma camada de água, que o separa do líquido do digestor (Figura 7.5) (Bisschops <i>et al.</i>, 2009).</p>  <p>1. Tanque de Mistura; 2. Reactor; 3. Armazenamento do Biogás; 4. Tanque de Armazenamento do Digerido; 5. Tubo de Saída do Biogás; 11. Tubo de Entrada.</p> <p>Figura 7.5 - Unidade de Digestão anaeróbia Water Jacket (adaptado de Werner <i>et al.</i>, 1989)</p>

### 7.3. Unidades de Digestão Anaeróbia de Saco

As unidades de digestão anaeróbia de saco consistem num tubo flexível de borracha ou de plástico, colocado numa vala com uma profundidade ligeiramente superior ao raio do digestor (Marchaim, 1992). Neste tipo de unidades de digestão, a parte superior do saco serve de gasómetro e a parte inferior de digestor anaeróbio (Werner *et al.*, 1989). A pressão do gás é obtida através do peso do digestor e da adição de pesos que pressionam o saco. Os materiais usados, plástico ou borracha sintética, possuem elevada resistência. No entanto, as condições meteorológicas e as falhas mecânicas representam uma ameaça para este tipo de digestores (Marchaim, 1992).

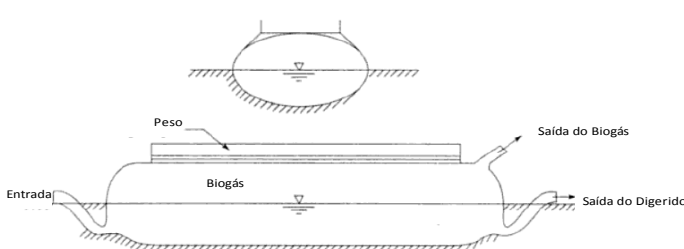
O sistema de alimentação de uma unidade de digestão anaeróbia de saco é por regra em *Batch*, possuindo a unidade uma vida útil que varia entre os 2 e os 5 anos (Werner *et al.*, 1989). Relativamente à dimensão, este tipo de unidades de digestão anaeróbia pode possuir digestores tubulares com um comprimento de 10 a 20 m e um diâmetro de 5 m (Werner *et al.*, 1989). O Quadro 7.5 sintetiza as principais vantagens e desvantagens deste tipo de unidades de digestão anaeróbia.

Quadro 7.5 - Principais vantagens e desvantagens das unidades de digestão anaeróbia de saco (adaptado de Werner *et al.*, 1989 e Marchaim, 1992)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Unidade pré-fabricada padronizada;</li> <li>➤ Baixo custo;</li> <li>➤ Facilidade de Instalação;</li> <li>➤ Instalação pouco profunda, ideal para zonas com lençóis freáticos elevados;</li> <li>➤ Digestor muito leve;</li> <li>➤ Facilidade de aquecimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Baixa pressão do gás;</li> <li>➤ Curta vida útil;</li> <li>➤ Susceptível a danos mecânicos.</li> </ul>

O Quadro 7.6 apresenta o principal tipo de unidades de digestão anaeróbia de saco existentes em muito pequena e pequena escalas.

Quadro 7.6 – Unidade de digestão anaeróbia de saco existente em muito pequena e pequena escalas

Unidade de digestão anaeróbia de Saco (Tailândia)
<p>A unidade de digestão anaeróbia de saco (Figura 7.6) foi desenvolvida na Tailândia, na década de 60, como resposta à dificuldade de instalar os restantes tipos de digestores, em zonas com lençóis freáticos elevados. Os materiais usados nos digestores de saco podem ser uma membrana denominada por <i>Red Mud Plastic</i> ou PVC. Este tipo de unidades são muito usadas na Tailândia, China, Coreia e nas Fiji para valorizar o chorume (Marchaim, 1992).</p>  <p>Figura 7.6 - Unidade de digestão anaeróbia de saco (adaptado de Werner <i>et al.</i>, 1989)</p>

## 8. Unidades de Digestão Anaeróbia centralizadas existentes em média e grande escala para valorização de resíduos sólidos orgânicos

Existem, actualmente, diversas unidades de digestão anaeróbia que são usadas comercialmente, em média e grande escala, para valorizarem a fracção sólida dos resíduos sólidos orgânicos. O Quadro 8.1 apresenta as tecnologias de digestão anaeróbia mais usadas para valorizar este tipo de resíduos. As unidades foram agrupadas relativamente ao teor de humidade do substrato.

Quadro 8.1 – Tipos de unidades de digestão anaeróbia usadas na valorização da fracção sólida dos resíduos sólidos orgânicos em média e grande escala (Vandevivere *et al.*, 2001)

Tipos de unidades de digestão anaeróbia	
Via Seca	DRANCO
	VALORGA
	KOMPOGAS
	BRV
Via Húmida	BTA
	WAASA

Devido ao facto de o presente trabalho abordar especificamente as unidades de digestão anaeróbia descentralizadas, não se irá aprofundar esta temática. Tendo em consideração este aspecto, apresenta-se de seguida uma pequena descrição de cada uma das unidades apresentadas no Quadro 8.1.

### DRANCO

As unidades de digestão anaeróbia que operam através da tecnologia DRANCO foram especificamente para valorizarem a fracção orgânica dos RSU (Baere, 2007). Neste tipo de unidades de digestão anaeróbia a mistura do conteúdo do digestor ocorre através do digerido que sai pela parte inferior; é então misturado com resíduo novo e é recirculado através de bombagem para a parte superior do digestor. A mistura de digerido e de resíduo ocorre na proporção de uma parte de resíduo digerido para seis partes de resíduo novo (Vandevivere, *et al.*, 2001). Este tipo de unidades de digestão anaeróbia opera na gama termofílica e é eficaz no tratamento de resíduos com um teor de sólidos que varia entre 23 a 28%, suporta cargas orgânicas de  $12 \text{ kg VS.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  e permanece estável com concentrações de amónia até  $2,5 \text{ g.L}^{-1}$  (Vandevivere, *et al.*, 2001).

### VALORGA

A tecnologia VALORGA foi desenvolvida em 1981 em França para valorizar a fracção orgânica dos RSU (Arsova, 2010).

Numa unidade de digestão anaeróbia com a tecnologia VALORGA, o digestor apresenta uma forma cilíndrica e a mistura no interior do mesmo ocorre com a injeção de biogás a alta pressão em intervalos de 15 minutos, através de uma rede de injectores instalados na base do digestor anaeróbico (Vandevivere, *et al.*, 2001). Este tipo de sistema de mistura apresenta uma elevada

eficiência pelo que o digerido que sai do digestor anaeróbio não necessita de ser recirculado. Uma unidade de digestão anaeróbia VALORGA pode operar na gama mesofílica e termofílica, com um teor de sólidos no substrato que varia entre os 25 e os 32% e concentrações de amónia até 3 g.L<sup>-1</sup> (Arsova, 2010).

### **KOMPOGAS**

A unidade de digestão anaeróbia com a tecnologia KOMPOGAS foi desenvolvida na Suíça nos anos 80. O sistema KOMPOGAS funciona em regime termofílico entre 55° e 60° e possui um tempo de retenção hidráulico médio entre 15 e 20 dias (Kossman, *et al.*, 1997). O digestor anaeróbio deste sistema é constituído por um cilindro horizontal que pode ser construído em aço ou em betão. Este possui um funcionamento em fluxo de pistão, que se obtém através da adição dos resíduos por um dos lados do digestor e através de um agitador central, situado no interior do digestor (Kossman, *et al.*, 1997). Este movimento no interior do digestor é responsável pela mistura / agitação do mesmo, minimizando desta forma a acumulação de sedimentos no interior do digestor. A unidade de digestão anaeróbia KOMPOGAS requer um teor de sólidos no substrato constante de 23% (Vandevivere, *et al.*, 2001). Para valores inferior a 23% de sólidos totais no substrato, partículas mais pesadas como a areia tendem a acumular-se na parte inferior do digestor e para valores superiores a 23%, o menor conteúdo em água dos resíduos leva a uma maior resistência à ocorrência do fluxo no interior do digestor (Vandevivere, *et al.*, 2001).

### **BRV**

A tecnologia de digestão anaeróbia BRV valoriza os resíduos sólidos orgânicos em duas etapas. Na primeira ocorre a hidrólise em condições que potenciam uma eficácia máxima desta etapa. Depois de ocorrer a hidrólise o substrato é bombeado até um digestor anaeróbio horizontal de fluxo de pistão onde é valorizado na gama termofílica durante 25 dias (Vandevivere, *et al.*, 2001).

Neste tipo de tecnologia de digestão anaeróbia, o teor de sólidos no substrato varia entre 25% e 35% e pode ser usado em unidades de digestão anaeróbia de média a grande escala (Vandevivere, *et al.*, 2001).

### **BTA**

A tecnologia de digestão anaeróbia BTA foi desenvolvida na Alemanha nos anos 80 para valorizar a fracção orgânica dos resíduos sólidos urbanos, ou os bio-resíduos (Arsova, 2010). A Tecnologia de digestão anaeróbia BTA dispõe de dois equipamentos patenteados conhecidos como hidropulper e hidrociclone, que fazem o pré-tratamento dos resíduos sólidos. No hidropulper é adicionada água aos resíduos, dado que esta tecnologia funciona com um teor de sólidos nos resíduos de 10% (*via húmida*) (Vandevivere, *et al.*, 2001). Este equipamento é ainda responsável por retirar os objectos de maiores dimensões e de maior peso que não são biodegradáveis (Arsova, 2010). No hidrociclone os resíduos não biodegradáveis de menores dimensões como areia e vidro são removidos (Arsova, 2010). Depois de sair do hidrociclone o substrato é pasturizado durante uma hora a 70°C e posteriormente é injectado no digestor de anaeróbio de mistura completa e de gama mesofílica (Vandevivere, *et al.*, 2001).

## **WAASA**

Esta tecnologia de valorização dos resíduos sólidos orgânicos foi pela primeira vez construída na cidade de Waasa na Filândia, em 1989. Esta unidade valoriza os resíduos com um teor de sólidos no substrato entre 10 e 15% (*via húmida*) (Vandevivere, *et al.*, 2001). Dado que é uma tecnologia que funciona *via húmida*, recorre a um pulper onde é feita a homogeneização e a diluição dos resíduos. Os resíduos são então pasteurizados durante uma hora a 70°C e são adicionados a uma pré-câmara antes de serem colocados no digestor anaeróbio de mistura completa (Vandevivere, *et al.*, 2001). Esta pré-câmara é a etapa diferenciadora desta tecnologia dado que é adicionado aos resíduos um inóculo que contém a mesma biomassa que está no interior do digestor. Esta pré-injecção de inóculo acelera o processo de digestão anaeróbia que ocorre no interior do digestor (Vandevivere, *et al.*, 2001).



## 9. Unidades de Digestão anaeróbia existentes em Portugal

Em Portugal, a primeira unidade de digestão anaeróbia foi instalada em 1953 e era constituída por digestores em *batch* que valorizavam estrume de vaca. Entre 1970 e 1980, um grande aumento das explorações agro-industriais levantou problemas relacionados com os resíduos destas unidades (Berardino, 2008). Nesta década, a digestão anaeróbia surgiu como uma solução para o problema deste tipo de resíduos e, conseqüentemente, o número de unidades de digestão anaeróbia, que valorizavam resíduos das explorações agro-industriais, aumentou de forma significativa.

Com a entrada de Portugal na União Europeia surgiu nova legislação aplicável às unidades de digestão anaeróbia e os novos fundos provenientes da União Europeia possibilitaram um desenvolvimento desta tecnologia em Portugal (Berardino, 2008). O Quadro 9.1 apresenta a evolução histórica da potência total instalada das unidades de produção de biogás, em Portugal. Estas unidades de produção de biogás englobam as unidades de digestão anaeróbia e o biogás proveniente de aterros sanitários.

Quadro 9.1- Evolução histórica da potência total instalada das unidades de produção de biogás, em Portugal, incluindo aterros sanitários (DGEG, 2011)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011 (até Jul.)
<b>Potência instalada Biogás (MW)</b>	1,0	7,0	8,2	8,2	12,4	12,4	20,0	28,0	37,3

Em Portugal, entre 2003 e 2010, a taxa de crescimento média anual da potência total instalada das unidades de produção de biogás foi de 61,0%. Esta taxa foi a segunda mais elevada, sendo a primeira a das tecnologias de produção de energia através de painéis fotovoltaicos, com 79,4%, de entre as diversas energias renováveis existentes em Portugal (DGEG, 2011).

O estudo mais recente, relativamente à caracterização das diversas unidades de produção de biogás em Portugal, remonta a 2005, tendo sido realizado pela Agência Regional de Energia e Ambiente do Centro – AREAC (Cláudia, 2004; ISR, 2006;). Através deste estudo foi possível identificar 71 unidades de digestão anaeróbia, das quais 48% foram caracterizadas, 29% apresentavam uma situação desconhecida e 23% encontravam-se desactivadas. Em 2005, estas unidades totalizavam uma potência instalada de 8,2 MW. Segundo o mesmo estudo, Portugal possui um potencial de instalação de 123 MW, distribuídos pelos diversos sectores do modo indicado no Quadro 9.2.

Quadro 9.2 – Distribuição do potencial de instalação de unidades de valorização do biogás, por sector, em Portugal (Cláudia, 2004)

Sector	Potência (MW)	Distribuição (%)
Agro-Pecuária	29	23,6%
Agro-Alimentar	15	12,2%
ETAR	41	33,3%

Sector	Potência (MW)	Distribuição (%)
RSU	38	30,9%

Através da observação do Quadro anterior é possível observar que em Portugal a produção de biogás é efectuada maioritariamente em ETAR e em aterros sanitários.

### **9.1. Biogás produzido através da fracção fermentável dos RSU em Portugal**

Em Portugal, o biogás produzido através da fracção fermentável dos RSU é obtido através da recolha do biogás em aterro e através de unidades de digestão anaeróbia centralizadas.

Relativamente ao biogás de aterro, em 2005 existiam em Portugal quatro centrais de valorização energética do biogás produzido deste modo, totalizando uma potência instalada de 4,9 MW (Envirogas, 2005).

No que respeita às unidades de digestão anaeróbia centralizadas para valorizarem a fracção orgânica dos RSU, Portugal encontra-se a dar os “primeiros passos” no sentido de valorizar este tipo de resíduos em larga escala, quando comparado com alguns países Europeus, como é o caso da Alemanha e Espanha, que em 2010, possuíam um total de 69 e 24 destas unidades, respectivamente (Vaz, 2009).

Em 2010, Portugal possuía as seguintes unidades de digestão anaeróbia em fase de exploração e de construção:

- SULDOURO – Unidade de Sermonde, Vila Nova de Gaia – Fase de Construção (APA, 2010);
- VALORSUL – ETVO, São Brás, Amadora – Fase de Exploração (APA, 2010);
- VALORLIS em parceria com a VALORSUL – Leiria – Fase de Construção (APA, 2010);
- ALGAR – São Brás de Alportel – Fase de Exploração ([www.ambienteonline.pt](http://www.ambienteonline.pt));
- VALNOR – Avis/Fronteira – Fase de Construção ([www.apea.pt](http://www.apea.pt));
- TRATOLIXO – Ecoparque da Abrunheira, Mafra – Fase de Construção (Saraiva, 2011).
- LIPOR – Central de valorização energética, Maia – Fase de Exploração ([www.lipor.pt](http://www.lipor.pt));

Relativamente a unidades de digestão anaeróbia descentralizadas, criadas especificamente para valorizar bio-resíduos alimentares, não foi encontrado nenhum registo de unidades desta tipologia em Portugal, para além de experiências realizadas à escala laboratorial.



# Caso de Estudo da Valorização da Fracção Orgânica dos RSU do *Campus da FCT/UNL*

## 10. Caracterização do Caso de Estudo: *Campus da FCT/UNL*

### 10.1. Localização e organização

A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) foi criada em 1977 através do Decreto-Lei n.º 402/73 de 11 de Agosto ([www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt)). Encontra-se situada no concelho de Almada, no Monte da Caparica, e constitui uma das nove unidades orgânicas da Universidade Nova de Lisboa (UNL). A FCT possui uma área de 30 hectares, com capacidade de expansão até 60 hectares. Actualmente, a FCT é uma das escolas portuguesas mais prestigiadas no ensino de engenharia e de ciências, possuindo 16 centros de investigação reconhecidos pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência. No diz respeito à sua estrutura, a FCT possui 14 sectores departamentais e 8 serviços de apoio ([www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt)).

Na Figura 10.1 é apresentada a planta do *Campus* da FCT onde é possível visualizar os diversos edifícios que compõem o *Campus*.



Figura 10.1 – Planta *Campus* da FCT ([www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt))

Na Figura 10.1 há a destacar a moderna biblioteca da FCT/UNL e outras infraestruturas como campos desportivos, creche, posto de enfermagem, livraria, agência bancária, agência de viagens, loja de conveniência, cantina e diversos restaurantes e cafés. Ainda de salientar é a residência de estudantes, que possui um total de 208 camas, localizada próxima do *Campus*.

## 10.2. População

Com o intuito de se avaliar a população de alunos, corpo docente e não docente, que frequentou a FCT no ano lectivo de 2010/2011, foi realizado um levantamento junto da Divisão de Recursos Humanos e da Divisão Académica. Na Divisão Académica, e através de dados fornecidos pela Dr<sup>a</sup>. Isabel Sequeira Pinto, Chefe da Divisão Académica da FCT, obteve-se o número de alunos que frequentou a FCT. Na Divisão de Recursos Humanos obteve-se os dados relativos ao número de docentes e não docentes.

O Quadro 10.1 apresenta os dados obtidos para a população da FCT.

Quadro 10.1– População do *Campus* da FCT no ano lectivo de 2010/2011

Tipo de população	Número de Pessoas
Alunos	7.500
Docentes	465
Não docentes	445
<b>Total</b>	<b>8.410</b>

## 10.3. Consumos de electricidade, água e gás

Os dados relativos ao consumo de electricidade, água e gás, presentes em facturas da FCT, foram obtidos junto da Divisão de Apoio Técnico (DAT) da FCT e dos serviços de acção social da UNL.

O Quadro 10.2 apresenta o consumo de electricidade da FCT durante o ano de 2010.

Quadro 10.2 – Consumo da electricidade do *Campus* da FCT em 2010

Período de Facturação	Consumo Global (MWh)
23-12-2009 a 22-12-2010	8.849

O Quadro 10.3 apresenta o consumo de água da FCT durante o ano de 2010.

Quadro 10.3 – Consumo de água do *Campus* da FCT em 2010

Período de Facturação	Consumo Global (m <sup>3</sup> )
16-12-2009 a 15-12-2010	69.451

A FCT não possui ligação à rede de distribuição de gás natural. Deste modo, a FCT possui três gasómetros que são abastecidos através de camiões cisterna.

A Figura 10.2 ilustra os locais onde se encontram situados os gasómetros.



Figura 10.2 – Localização dos gasómetros no *Campus* da FCT/UNL (adaptado de [www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt))

O Quadro 10.4 apresenta o consumo de gás propano, a granel, da FCT, durante o ano de 2010.

Quadro 10.4 – Consumo de gás do *Campus* da FCT em 2010

Período de Facturação	Consumo Global (m <sup>3</sup> )
23-12-2009 a 22-12-2010	88.493,40

O consumo de gás que se apresenta no Quadro 10.4 não inclui o consumo de gás de botija que é feito pontualmente por alguns laboratórios da FCT/UNL, pelo facto do mesmo ser tido como não significativo.

#### 10.4. Resíduos produzidos

Na FCT, devido às diversas actividades que diariamente se realizam no *Campus*, produz-se uma grande diversidade de resíduos (Semitela, 2007):

- Resíduos equiparados a urbanos – Resíduos cuja natureza ou composição é muito semelhante aos resíduos sólidos urbanos (RSU);
- Resíduos verdes – Resíduos que resultam da manutenção dos espaços verdes;
- Fluxos especiais de resíduos – Resíduos que se encontram abrangidos por legislação específica como: Resíduos de embalagens, veículos em fim de vida, pilhas e acumuladores, resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos e óleos usados;
- Resíduos perigosos – Resíduos produzidos nos diversos laboratórios;
- Resíduos hospitalares – Resíduos produzidos no posto de enfermagem;
- Outros fluxos especiais de resíduos – Óleos alimentares usados.

No ano 2000 e no ano lectivo 2006/2007 realizaram-se dois estudos que possibilitaram caracterizar e quantificar os diversos resíduos produzidos no *Campus* da FCT/UNL. O primeiro estudo foi efectuado no âmbito do projecto ambiental “*Campus Verde*”, no ano de 2000 ([www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt)). Neste estudo realizou-se uma estimativa da produção de resíduos através do número de contentores

existentes no *Campus*, do seu nível de enchimento e da frequência de recolha dos mesmos. Obtiveram-se os dados que se encontram apresentados no Quadro 10.5, relativos ao ano de 2000.

Quadro 10.5 - Produção estimada de RSU indiferenciados e depositados nos Ecopontos produzidos na FCT no ano de 2000 (adaptado de [www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt))

Localização	Tipo de resíduo	Quantidade (t)
<b>Contentores indiferenciados (RSU)</b>	Papel e Cartão	53,3
	Vidro	36,9
	Embalagens (plástico e metal)	36,9
	Orgânicos	71,7
	Indiferenciados / finos	6,0
	<b>Total</b>	<b>204,8 ou 28 kg.aluno<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup></b>
<b>Ecopontos</b>	Plástico	3,4
	Vidro	13,4
	Papel	4,5
	<b>Total</b>	<b>21,3</b>

O segundo estudo, denominado “Gestão de resíduos de *Campus* Universitários”, foi realizado por Semitela (2007) e teve por objectivo elaborar um plano de acção, integrado e sustentável, para a gestão dos resíduos produzidos no *Campus* da FCT/UNL. Com este estudo foi possível quantificar, através de informações fornecidas por órgãos da FCT e pelos registos dos operadores de recolha, diversos tipos específicos de resíduos como sejam os resíduos verdes, óleos usados, entre outros. Este estudo permitiu ainda efectuar a caracterização e quantificação dos RSU depositados nos contentores indiferenciados, com base em três campanhas de recolha: uma durante uma semana típica de aulas e duas durante uma semana de estudo/exames. No Quadro 10.6 são apresentados os resultados obtidos no que respeita à produção estimada de RSU indiferenciados.

Quadro 10.6 - Produção estimada de RSU indiferenciados produzidos no ano lectivo 2006/2007 (adaptado de Semitela, 2007)

	1ª Campanha – Período de Aulas	2ª e 3ª Campanhas – Período de Exames / Estudo	Férias / Fins-de- semana / Feriados e Pontes
<b>Nº de dias abrangidos na campanha</b>	6	7	-
<b>Nº de dias num ano representados pela campanha</b>	140	60	134
<b>Produção média diária (kg/dia)</b>	961,70	798,57	48,10
<b>Produção anual estimada (t/ano)</b>	134,64	47,91	6,54

Através da observação do Quadro 10.6 conclui-se que a primeira campanha foi realizada durante o período de aulas, onde, como seria expectável, se obteve a produção mais elevada de RSU indiferenciados, pois este é o período em que o mais elevado número de alunos e do corpo docente

e não docente se encontra a frequentar diariamente a FCT/UNL. Durante o período de “Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes” não foram considerados os dias correspondentes ao mês de Agosto, devido ao facto de a produção de RSU indiferenciados não ser significativa por ser o mês com menor “actividade” na FCT/UNL.

No Quadro 10.7, encontra-se a composição física desagregada dos quantitativos dos resíduos que foram apresentados no Quadro 10.6.

Quadro 10.7 - Composição física dos RSU indiferenciados produzidos no ano lectivo 2006/2007. (adaptado de Semitela, 2007)

		Período de Aulas	Período de Exames / Estudo / Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes
<b>Orgânicos (% m/m)</b>	<b>Alimentares</b>	12,70	29,24
	<b>Resíduos de Jardim</b>	0,80	0,23
<b>Papel / Cartão (% m/m)</b>		42,47	31,87
<b>Plásticos (% m/m)</b>		19,95	14,48
<b>Vidro (% m/m)</b>		8,40	8,98
<b>Têxteis (% m/m)</b>		0,23	0,38
<b>Metais (% m/m)</b>		2,17	2,46
<b>Madeira (% m/m)</b>		0,04	0,35
<b>Outros (% m/m)</b>		3,70	3,78
<b>Finos (&lt;20 mm) (% m/m)</b>		9,54	8,23

Ao longo da presente dissertação, a fracção orgânica dos RSU, constituída especificamente por resíduos alimentares, é designada por bio-resíduos alimentares, de acordo com o Livro Verde da Comunidade Europeia (2008). Deste tipo de resíduos estão excluídos os resíduos biodegradáveis de jardins e parques (ver secção 1.1.). Através da observação do Quadro 10.7 é perceptível que a maior percentagem de bio-resíduos alimentares, que integra a composição dos RSU indiferenciados, está presente nestes no período de Exames / Estudo / Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes, período este em que a população de alunos que frequenta diariamente a FCT/UNL apresenta maiores flutuações. Estas flutuações na população de alunos no *Campus*, leva a que seja mais difícil estimar, por parte dos diversos espaços comerciais, que se encontram inseridos na FCT/UNL, as reais necessidades de refeições por dia, resultando esta dificuldade num maior desperdício de bio-resíduos alimentares como fica manifesto no Quadro 10.7 (Semitela, 2007).

### 10.5. Estimativa dos bio-resíduos alimentares produzidos

Na FCT/UNL os bio-resíduos alimentares são produzidos essencialmente nos cafés, bares, restaurantes, e na cantina da FCT. Deste modo, tanto a “Estimativa 1” como a “Estimativa 2” apresentadas de seguida são uma aproximação à quantidade de resíduos alimentares produzida nestas instalações, decorrentes da preparação de refeições e dos desperdícios alimentares,

podendo existir um desvio em relação à situação real que seria importante ser avaliado num trabalho futuro.

Com o intuito de se obter a quantidade dos bio-resíduos alimentares produzidos no *Campus* da FCT recorreu-se a dois tipos de estimativas diferentes:

- Estimativa 1 – Com base nos dados apresentados na secção 10.4.;
- Estimativa 2 – Tendo em conta o número médio de refeições servidas por dia.

#### **Estimativa 1:**

A presente estimativa realizou-se através dos dados apresentados na secção 10.4. No quadro 10.6 é possível observar que a produção estimada de RSU indiferenciados, produzidos no ano lectivo 2006/2007, foi de 134,6, 47,9 e 6,54 toneladas nos períodos de Aulas de Exames/ Estudo e de Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes, respectivamente, num total de 189,1 toneladas por ano. No quadro 10.7 é possível observar que 12,70% e 29,24% dos RSU indiferenciados produzidos na FCT/UNL, no período de Aulas e de Exames / Estudo / Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes, respectivamente, no ano lectivo de 2006/2007, corresponderam a bio-resíduos alimentares. Recorrendo aos dados anteriores e aos valores totais anuais de RSU indiferenciados apresentados no quadro 10.6, obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 10.8, que são relativos à quantidade total de bio-resíduos alimentares, produzidos no *Campus* da FCT/UNL, no ano lectivo de 2006/2007.

Quadro 100.8 - Produção estimada de bio-resíduos alimentares, no ano lectivo de 2006/2007, tendo por base os dados apresentados na secção 10.4

	<b>Período de Aulas</b>	<b>Período de Exames / Estudo</b>	<b>Férias / Fins-de- semana / Feriados e Pontes</b>
<b>Produção anual estimada de bio-resíduos alimentares (t.ano<sup>-1</sup>)</b>	17,1	14,0	1,5
<b>Produção diária estimada de bio-resíduos alimentares (kg.dia<sup>-1</sup>)</b>	122,1	233,5	14,1

Os valores de bio-resíduos alimentares produzidos por dia (Quadro 10.8), foram obtidos através de um estudo realizado no ano lectivo de 2006/2007, ano em que a população da FCT/UNL totalizava, entre alunos, docentes e não docentes, 7.041 pessoas. No ano lectivo de 2010/2011, como ficou patente através do Quadro 10.1, a população da FCT/UNL totalizava o valor de 8.410 pessoas.

Assumido que a produção de resíduos terá aumentado de forma directa com o número de pessoas que frequenta a FCT/UNL, a estimativa da produção de bio-resíduos alimentares, para o ano lectivo de 2010/2011, é a que se apresenta no Quadro 10.9.

Quadro 10.9 – Produção estimada de bio-resíduos alimentares, no ano lectivo de 2010/2011, tendo por base a variação da população que desenvolve actividade no *Campus* da FCT/UNL

	Período de Aulas	Período de Exames / Estudo	Férias / Fins-de- semana / Feriados e Pontes
<b>Produção anual estimada de bio-resíduos alimentares (t.ano<sup>-1</sup>)</b>	20,4	16,7	1,8
<b>Produção diária estimada de bio-resíduos alimentares (kg.dia<sup>-1</sup>)</b>	145,9	278,9	16,8

Através do quadro anterior é possível concluir que, no ano lectivo de 2010/2011, sem entrar em consideração com o mês de Agosto, pelos motivos apresentados na secção 10.4. foi produzido um total de 38,94 toneladas de bio-resíduos alimentares.

### Estimativa 2:

Esta estimativa tem por base o número total de refeições servidas anualmente na FCT/UNL, que foi apurado através da realização de um inquérito aos responsáveis de todos os espaços comerciais da FCT/UNL, que incluem: restaurantes, cafés, bares e a cantina. Através deste inquérito foi possível apurar o número médio de refeições servidas por dia, em época baixa e em época alta. Solicitou-se aos responsáveis de todos os espaços comerciais o número de refeições desagregadas por estas duas épocas, devido às diferenças que se verificam na população que frequenta a FCT/UNL nestes dois períodos. A época baixa engloba as épocas de estudo / exames, que em média possui um total de 60 dias por ano. A época alta, que em média possui uma duração total anual de 140 dias, diz respeito à altura em que decorrem aulas na FCT/UNL.

Quadro 10.10 – Número de refeições servidas no *Campus* da FCT, em 2011

Estabelecimento	Nº Médio de Refeições Servidas por Dia		Número Total de Refeições Servidas num Ano
	Época Baixa	Época Alta	
Bar Biblioteca	20	60	9.600
Bar Dona Teresa	100	180	31.200
Bar do Departamental	140	180	33.600
Bar ed. VII	80	140	24.400
Bar EDITEI	0	20	2.800
Bar Girassol	20	70	11.000
Casa do Pessoal	40	70	12.200
Cantina	800	1.400	244.000
Restaurante Campus.come	25	30	5.700
<b>Total</b>	<b>3.375</b>		<b>374.500</b>

Considerou-se que, no período de Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes, os espaços comerciais identificados no Quadro 10.10 se encontram encerrados, pelo que não são produzidos resíduos durante este período.

Em média, nas cozinhas industriais o desperdício de alimentos, que está envolvido na preparação de uma refeição, é de 15%. Para além desta quantidade, aproximadamente 10% dos alimentos são perdidos no momento em que são serviços ou após a refeição (Embrapa, 2007). Considerando que uma refeição média possui 225 g de alimentos, conclui-se que, por refeição, sejam desperdiçados aproximadamente 56,3 g de alimentos. Entrando em conta com o valor médio diário de refeições servidas na época baixa e na época alta, obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 10.11 para os bio-resíduos alimentares, produzidos nos estabelecimentos comerciais da FCT/UNL.

Quadro 10.11 – Produção estimada de bio-resíduos alimentares, tendo por base o número de refeições servidas nos espaços comerciais da FCT/UNL

	Época Baixa	Época Alta
Produção anual estimada de bio-resíduos alimentares (kg.dia <sup>-1</sup> )	69,0	121,0
Total produzido num ano (kg)	21.084	

#### 10.6. Caracterização dos bio-resíduos alimentares produzidos no *Campus* da FCT/UNL

Os bio-resíduos alimentares que são produzidos nos bares, nos restaurantes, e na cantina da FCT são vulgarmente conhecidos na terminologia anglo-saxónica por “restaurant wastes” ou “canteen wastes”. Deste tipo de resíduos excluem-se os resíduos biodegradáveis de parques e jardins. Os bio-resíduos alimentares constituem um substrato com um elevado potencial para ser valorizado através da digestão anaeróbia, devido à sua elevada biodegradabilidade e elevado teor de humidade (Neves, 2009).

No que concerne aos bio-resíduos alimentares da FCT/UNL, não existem estudos que caracterizem especificamente esta fracção dos resíduos produzidos neste *Campus* universitário. Assim sendo, recorreu-se a uma revisão bibliografia para efectuar a sua caracterização.

Com o intuito de se obter uma caracterização o mais fidedigna possível e dado que as características dos bio-resíduos alimentares divergem consoante o local, os hábitos culturais e os regimes alimentares, recorreu-se a estudos realizados com misturas de bio-resíduos alimentares provenientes de cantinas e restaurantes em Portugal e na União Europeia. No Quadro 10.12 é dado particular destaque aos dados da caracterização dos resíduos que foram recolhidos na cantina do Campo Militar de Santa Margarida em Portugal e do restaurante da Universidade do Minho, localizada no “*Campus* de Gualtar”, em Braga, Portugal. Em ambos os casos, as amostras analisadas foram compostas com base em resíduos das diversas refeições servidas nesses *Campus*, ao longo de cinco dias (Cousiño, 2007; Neves, 2009). Para além destas referências bibliográficas referem-se ainda os trabalhos de (Reinhart, 2004; Arsova, 2010; Kallimani *et al.*, 2010) sobre a caracterização de bio-resíduos alimentares de cozinhas domésticas, os trabalhos de



(Ortega, Barrington, Arrington, Guiot, 2008; Climenhaga, Banks, 2008) sobre a caracterização de bio-resíduos alimentares de Cantinas Universitárias e finalmente o trabalho de (Capela *et al.*, 2008) com a caracterização dos bio-resíduos alimentares de um restaurante em Portugal.

Posto isto no Quadro 10.12 apresenta-se a composição dos bio-resíduos alimentares.

Quadro 10.12 – Composição dos bio-resíduos alimentares

Bio-Resíduo Alimentar - Local de Recolha	Parâmetro						Referência Bibliográfica
	pH	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	C.Q.O (g/g)	Lípidos (g/g)	Razão C/N	
Cozinhas Domésticas	-	30	27,5	-	-	-	(Reinhart, 2004)
Cantina Campo Militar de Sta. Margarida - Portugal	5,4	16,54±0,16	15,12±0,14	1,4±0,4 <sup>1</sup>	-	16±3	(Cousiño, 2007)
Restaurante - Portugal	-	32	-	0,9 <sup>2</sup>	-	-	(Capela <i>et al.</i> , 2008)
Universidade - Cantina	-	28	28,5	0,5 <sup>2</sup>	0,22 <sup>2</sup>	-	(Climenhaga, Banks, 2008)
Universidade - Cantina	-	22	-	1,1 <sup>2</sup>	-	-	(Ortega, Barrington, Arrington, Guiot, 2008)
Universidade do Minho, Braga - Portugal	-	23,8±1	21,4±7	3,2±0,7 <sup>1</sup>	0,20±0,08 <sup>1</sup>	13±1	(Neves, 2009)
Cozinhas Domésticas	-	<30	28	-	-	-	(Arsova, 2010)
Cozinhas Domésticas	-	23	-	-	-	-	(Kallimani <i>et al.</i> , 2010)

Legenda: 1- Massa de resíduos expressos em peso húmido;

2- Massa de resíduos expressos em peso seco.

Através da observação do quadro 10.12 obtém-se um teor médio sólidos totais de 25% e uma razão de carbono / azoto de 14, para os bio-resíduos alimentares a valorizar no *Campus* da FCT/UNL.

A densidade dos bio-resíduos alimentares não compactados é apresentada no Quadro 10.13.

Quadro 10.13 – Densidade dos bio-resíduos alimentares

Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Referência bibliográfica
514	(www.epa.vic.gov.au)
700	(Hessami <i>et al.</i> , 1996)
600	(Tchobanoglous, 1993)
540	(www.wastecap.org)
400 - 600	(Bridgwater, Parfitt, 2008)

Através da observação do Quadro 10.13, conclui-se que a densidade média dos bio-resíduos sólidos a valorizar é de 500 kg.m<sup>-3</sup>.



## 11. Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta

### 11.1. Critérios de construção e dimensionamento

A unidade de digestão anaeróbia proposta para valorizar os bio-resíduos alimentares da FCT/UNL foi estudada e desenvolvida com o objectivo de satisfazer os seguintes critérios:

- Cumprir com toda a legislação no que toca a este tipo de unidades, citada na secção 1 do presente documento, nomeadamente: Decreto-Lei n.º239/97, de 9 de Setembro; Decreto-Lei n.º67/98, de 18 de Março, e Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro;
- Maximizar a produção de biogás por unidade de tempo;
- Minimizar os *inputs* energéticos à unidade de digestão anaeróbia;
- Possuir uma manutenção rápida e fácil, para que o(s) operador(es) da unidade apenas necessite(m) de formação e treino elementar para que possa(m) manter a unidade;
- Operar com o mínimo de monitorização, com o intuito de ser fácil de operar;
- Ser durável ou seja usar equipamentos que possuam um tempo de vida longo;
- Ser compacta com o intuito de minimizar o espaço ocupado pela unidade;
- Possuir um baixo custo de manutenção;
- Possuir um baixo custo de instalação e de operação.

### 11.2. Bio-resíduos alimentares a valorizar na unidade de digestão anaeróbia

Na secção 10.5 da presente dissertação, foram apresentadas duas estimativas para determinar a quantidade de bio-resíduos alimentares que são produzidos na FCT/UNL. O Quadro 11.1 apresenta os resultados obtidos através das estimativas 1 e 2.

Quadro 11.1– Produção de bio-resíduos alimentares estimada, tendo por base os dados apresentados na secção 10.5.

	Período de Aulas	Período de Exames / Estudo	Férias / Fins-de-semana / Feriados e Pontes
<b>Estimativa 1 (kg.dia<sup>-1</sup>)</b>	145,9	278,9	16,8
<b>Estimativa 2 (kg.dia<sup>-1</sup>)</b>	121,0	69,0	-

A estimativa 1 foi feita com base no estudo de caracterização dos RSU produzidos na FCT/UNL analisado na secção 10.5, extrapolando os dados obtidos para o ano lectivo de 2006/2007 (Quadro 10.8) para o ano lectivo de 2010/2011 (Quadro 10.9), tendo em conta a variação do número de alunos, de docentes e não docentes, de um ano lectivo para o outro.

A estimativa 2 foi desenvolvida a partir de uma extrapolação teórica feita com base num inquérito realizado ao número de refeições servidas por dia nos espaços comerciais da FCT/UNL. As diferenças entre os valores obtidos através das estimativas 1 e 2 podem ser explicadas pelas diferentes metodologias e abrangência destas mesmas estimativas, ou seja, a estimativa 1 engloba todos os resíduos que foram colocados em contentores de RSU indiferenciados, incluindo os bio-resíduos alimentares que são produzidos na residência de estudantes que, como foi mencionado

anteriormente, possui um total de 208 camas e diversas cozinhas. A estimativa 2 diz apenas respeito aos espaços de restauração existentes no *Campus* da FCT/UNL, não incluindo a residência de estudantes.

Analisando globalmente as estimativas 1 e 2, conclui-se que a primeira é mais aproximada à realidade da FCT/UNL dado que é baseada num estudo realizado nesta instituição de ensino e que abrange toda a faculdade. A estimativa 2 representa uma aproximação à produção dos bio-resíduos alimentares dos espaços restauração da FCT/UNL, que são os principais produtores de bio-resíduos alimentares do *Campus*.

Tendo em consideração o que foi mencionado anteriormente e para efeitos de dimensionamento de uma unidade de digestão anaeróbia, considerou-se que a quantidade de bio-resíduos alimentares, a ser valorizada diariamente, irá ser de 125,0 kg por dia, durante 224 dias por ano, dado que, no mês de Agosto, a FCT/UNL se encontra encerrada e nos sábados domingos e feriados não existem operadores para fazer funcionar a unidade de digestão anaeróbia. Assim relativamente aos 334 dias em que a unidade de digestão anaeróbia está em funcionamento, em 110 não irão ser adicionados resíduos à unidade de digestão anaeróbia por corresponderem a dias de fim-de-semana e de feriados. Por ser um valor intermédio, entre as duas estimativas de produção de bio-resíduos alimentares analisadas anteriormente, é expectável que, o valor de 125,0 kg por dia de bio-resíduos alimentares, seja facilmente atingido e superado, podendo ser o excedente diário armazenado por um período de tempo limitado para fazer face a períodos em que a produção de bio-resíduos alimentares é inferior.

A composição dos bio-resíduos alimentares é semelhante à apresentada no quadro 10.12 do secção 10.6. da presente dissertação. Relativamente ao teor de sólidos totais, através do quadro 10.12, obtém-se um valor médio de 25% que corresponde a um teor de humidade média dos bio-resíduos alimentares a valorizar de cerca de 75% (m/m). No que toca à densidade os bio-resíduos alimentares a valorizar e, apesar da mesma ser muito variável em função da mistura de bio-resíduos alimentares disponível, obtém-se um valor médio de  $500 \text{ kg.m}^{-3}$  para este tipo de resíduos, com base no quadro 10.13. Entrando em conta com a quantidade de bio-resíduos alimentares a valorizar por dia (125 kg) e com a densidade média dos mesmos ( $500 \text{ kg.m}^{-3}$ ), obtém-se um valor de  $0,250 \text{ m}^3$  de bio-resíduos alimentares a valorizar diariamente na unidade de digestão anaeróbia.

### **11.3. Sistema de Recolha de Resíduos**

No *Campus* da FCT/UNL dever-se-á proceder à recolha dos bio-resíduos alimentares, nos espaços de restauração identificados no quadro 10.10 e na residência de estudantes.

Opta-se por este sistema de recolha, dado que os espaços comerciais listados no quadro 10.10 e a residência de estudantes são os principais produtores deste tipo de resíduos no *Campus* da FCT/UNL. Através deste sistema de recolha evita-se a triagem de todos os contentores de recolha de RSU indiferenciados, pois os bio-resíduos alimentares são recolhidos directamente nos principais

locais de produção em contentores específicos para o efeito. Devido ao sistema de recolha escolhido, todos os bio-resíduos alimentares que forem colocados em contentores de RSU indiferenciados, não serão encaminhados para o sistema de digestão anaeróbia. Estes resíduos são considerados como sendo não relevantes, devido à sua elevada dispersão e reduzida quantidade, como ficou manifesto na secção 10.5, da presente dissertação. No entanto, de forma a maximizar a quantidade de bio-resíduos alimentares recolhidos e ainda com o intuito de promover e divulgar a unidade de digestão anaeróbia, existente no *Campus* da FCT/UNL, irá proceder-se igualmente à recolha de bio-resíduos alimentares, em locais acessíveis a todos os alunos e pessoal docente e não docente.

Nos locais onde será realizada a recolha dos bio-resíduos alimentares, a mesma será efectuada através de sacos correctamente identificados para o efeito, que serão distribuídos de forma gratuita. Nestes locais, irá ser fornecida formação aos colaboradores com o intuito de colocarem apenas os resíduos apropriados nos sacos destinados à unidade de digestão anaeróbia. A completar esta formação, diversa informação, como a apresentada no Quadro 11.2, será disponibilizada nos locais de recolha de resíduos e em especial nos contentores de recolha colocados nos diversos locais acessíveis a todos os alunos e pessoal docente e não docente e que possibilite distinguir facilmente o que pode e não pode ser colocado nos sacos e nos contentores. O Quadro 11.2 ilustra o que pode e não pode ser usado na digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares.

Quadro 11.2 – Resíduos admissíveis e não admissíveis na digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares (Banks, 2008; Slack, 2010)

<b>Resíduos admissíveis</b>	<b>Resíduos não admissíveis</b>
Carne e peixe	Todo o tipo de objectos de vidro, plástico e metal
Frutas e vegetais e todas as suas cascas	Solo, cascalho e pedras
Cascas de ovos	Todo o tipo de objectos de papel
Sacos de chá e borra de café	Fezes de cão e areia de gatos
Todo o tipo de gordura animal	Fraldas e qualquer tipo de resíduos sanitários
Pão massas e todo o tipo de alimentos de pastelaria	Cosméticos e produtos farmacêuticos
Todo o tipo de alimentos cozinhados	Todo o tipo de detergentes e produtos de limpeza
Cereais	Ossos
Caixas de comida biodegradáveis	Reagentes e materiais dos laboratórios

A separação dos resíduos nos locais de produção tem por objectivo evitar a ocorrência de contaminação por matérias não biodegradáveis, a danificação dos equipamentos das unidades e a ocupação do volume do digestor anaeróbio por materiais inertes. Com esta separação pretende-se ainda acautelar que sejam introduzidas substâncias como cosméticos, produtos farmacêuticos, detergentes, produtos de limpeza, reagentes e materiais de laboratório, pois estes afectam a população microbiana do digestor anaeróbio (Rapport *et al.*, 2008).

A informação e formação fornecida aos colaboradores dos estabelecimentos de restauração, onde se irá proceder à recolha dos bio-resíduos alimentares, facilita o processo de triagem dos resíduos à

entrada da unidade de digestão anaeróbia, dado que os mesmos já foram seleccionados nos locais de produção.

No final de cada dia útil, os bio-resíduos alimentares, que se encontram nos diversos contentores dispersos pela FCT/UNL e que foram ensacados nos estabelecimentos de restauração, são transportados para a unidade de digestão anaeróbia. Este transporte, devido às quantidades de bio-resíduos alimentares envolvidos, poderá ser realizado através de uma viatura ligeira.

#### **11.4. Parâmetros de Funcionamento da Unidade de Digestão Anaeróbia**

##### **Temperatura**

Na secção 4.1 procedeu-se à análise das possíveis gamas de temperatura a que a digestão anaeróbia pode ocorrer e o efeito da mesma na produção de biogás. Para o funcionamento da unidade de digestão anaeróbia em causa foi seleccionada a gama mesofílica (30-42°C). Escolheu-se esta gama de temperatura, mais precisamente a temperatura de 35°C, pelo facto de esta ser a temperatura mais adequada para que o processo de digestão anaeróbia dos bio-resíduos alimentares decorra de uma forma mais estável (Curry, Pillay, 2009).

Na unidade de digestão anaeróbia escolhida, para que seja possível manter o rendimento da mesma no que toca à produção de biogás, é imperativo que a temperatura do digestor se mantenha próxima nos 35°C (Gray, *et al.*, 2008), dado que variações abruptas da temperatura destabilizam o processo. A variação máxima de temperatura no digestor anaeróbio nesta gama de temperatura é de  $\pm 1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  (Kossmann *et al.*, 1997). Como ficou patente na secção 4.1., as unidades de digestão anaeróbia que operam nesta gama de temperatura possuem microrganismos que toleram grandes alterações no meio (Arsova, 2010). Por outro lado, estas unidades são, por norma, mais fáceis e mais baratas de construir e operar quando comparadas com as unidades que funcionam em regime termófilico (Arsova, 2010).

##### **pH**

A digestão anaeróbia pode ocorrer entre os 5,5 e os 8,5 (Ostrem, Nickolas, 2004). No entanto, numa unidade de digestão anaeróbia que valoriza bio-resíduos alimentares na gama mesofílica, o pH ideal deverá ser de 7,0 no interior do digestor, com o intuito de criar condições que possibilitem a existência de bactérias acidogénicas e metanogénicas, sem que se propicie o aparecimento de condições de inibição (Banks, 2008).

##### **Nutrientes**

Os bio-resíduos alimentares constituem um substrato com um elevado potencial para ser valorizado através da digestão anaeróbia, devido à sua elevada biodegradabilidade (Cousiño, 2007; Banks, 2008; Neves, 2009). Segundo alguns autores, os bio-resíduos alimentares possuem todos os nutrientes necessários para fazer face às necessidades dos microrganismos no interior do digestor

(Zhang, 2007; Neves, 2009). No entanto, para outros autores, os bio-resíduos alimentares não possuem, por si só, todos os nutrientes necessários para fazer face às necessidades das populações microbianas no interior do digestor (Ciménhaga, 2008), apresentando como principal limitação a razão C/N. Esta razão, segundo alguns autores, ronda os 28 para os bio-resíduos alimentares (Kossmann *et al.*, 1997); outros autores apresentam valores bastante inferiores para esta razão que variam entre os 13 e os 16 (Cousiño, 2007; Neves, 2009). Como foi, mencionado na secção 5.3, para que o processo de digestão anaeróbia ocorra de forma estável, a razão C/N tem de se situar entre 15-30, possuindo, para diversos autores, o valor ideal de 25 (Monnet, 2003). Estas diferenças nas razões óptimas C/N prendem-se com o facto de os mesmos poderem ser constituídos por um conjunto de substâncias muito heterogéneo presente em quantidades muito distintas.

### Substâncias inibidoras ou tóxicas

Os bio-resíduos alimentares não possuem substâncias inibidoras ou tóxicas relevantes para o processo de digestão anaeróbia (Neves, 2009). No entanto, no decorrer do processo de digestão anaeróbia, e como foi mencionado na secção 4.4., as características de rápida biodegradabilidade dos bio-resíduos alimentares levam a que a etapa da acidogénese ocorra de forma rápida, o que origina a acumulação de AGV e a consequente acidificação do meio. Esta acidificação inibe as bactérias intervenientes na etapa da metanogénese, com a consequente diminuição da produção de biogás. No processo de digestão anaeróbia dos bio-resíduos alimentares, a concentração de AGV deverá ser frequentemente monitorizada com o objectivo de garantir que a mesma não ultrapasse o valor de 2,0 g de acetato.L<sup>-1</sup> (Mcarty *et al.*, 1961).

### Tempo de Retenção Hidráulico e Carga Orgânica

O TRH e a carga orgânica, como mencionado anteriormente (secção 5.2. e 5.1.), são parâmetros fundamentais para maximizar a produção de biogás e para dimensionar a unidade de digestão anaeróbia.

O Quadro 11.3 apresenta os diferentes TRH e correspondentes cargas orgânicas usadas em unidades de digestão anaeróbia que foram desenvolvidas para valorizar bio-resíduos alimentares, na gama de temperatura mesofílica, em regime contínuo.

Quadro 11.3 – TRH e Carga Orgânica usada em diversas unidades de digestão anaeróbia

TRH (dias)	Carga Orgânica (Kg SV. m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> )	Referência
20	-	(Hessami <i>et al.</i> , 1996)
31,5	6,7	(Banks, 2008)
40	-	(Bisschops <i>et al.</i> , 2009)
42,5	8,3	(Riuji, 2009)
42,5	10,6	
58,8	7,8	(Gyalpo, 2010)

Através da observação do quadro anterior, conclui-se que, a maior parte das instalações de digestão anaeróbia a funcionar em regime mesofílico que valorizam bio-resíduos alimentares, possuem um TRH médio de aproximadamente 40 dias e uma carga orgânica de  $8,0 \text{ kg SV.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$ , pelo que estes irão ser os valores a usar no presente caso de estudo.

### 11.5. Condições de Funcionamento da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta

Na secção 6.1. da presente dissertação foram abordados os aspectos gerais, que afectam o dimensionamento e os equipamentos de uma unidade de digestão anaeróbia. A Figura 11.1 apresenta, a vermelho, os aspectos técnicos que foram seleccionados para a unidade de digestão anaeróbia proposta.

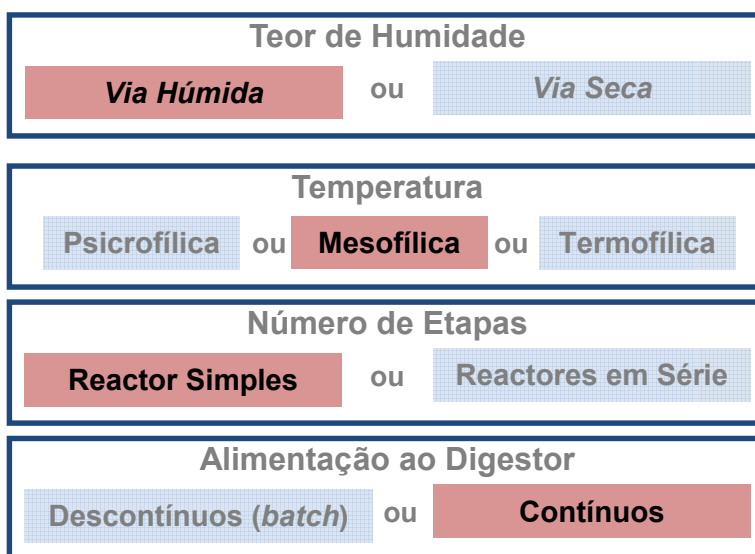


Figura 11.1- Aspectos escolhidos para o funcionamento do digestor anaeróbio (adaptado de Bisschops *et al.*, 2009)

#### Teor de Humidade

Através da observação da Figura 11.1, fica patente que o teor de humidade escolhido para o funcionamento do digestor anaeróbio e, consequentemente, da unidade de digestão anaeróbia, é a *via húmida*. A opção pela *via húmida*, com um teor de sólidos totais de 14% (Ostrem, Nickolas, 2004), não é suportado pelo que foi mencionado no Quadro 6.1, dado que os resíduos orgânicos domésticos e, consequentemente, os bio-resíduos alimentares, são habitualmente valorizados por *via seca*. A valorização por *via seca* é a mais indicada para este tipo de resíduos, devido ao alto teor de sólidos totais dos mesmos (média de 25% obtida a partir do Quadro 10.12) e a um maior rendimento relativamente à produção de biogás, como ficou patente no Quadro 6.2 da presente dissertação. A valorização por *via seca* é o método mais comumente usado para valorizar a fracção orgânica dos RSU em unidades de digestão anaeróbia centralizadas, como ficou perceptível no Quadro 8.1, de onde se conclui que as tecnologias mais usadas actualmente por *via seca* são as seguintes: DRANCO, VALORGA, KOMPOGAS, BRV.



Apesar de todas estas vantagens e das provas dadas pelas unidades de digestão anaeróbia para valorizar a fracção orgânica dos RSU de forma centralizada por *via seca*, optou-se por uma unidade a funcionar por *via húmida*, pois todas as unidades de muito pequena e pequena escalas, instaladas actualmente e aptas a valorizarem este tipo de resíduos, usam a digestão anaeróbia por *via húmida*.

Para além disso, todas as unidades de digestão anaeróbia instaladas à escala laboratorial e em piloto que pretendiam estudar a digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares em muito pequena e em pequena escalas e que cumpriam toda a legislação em vigor na União Europeia, apontam para que seja usada a digestão anaeróbia por *via húmida* (Hessami, *et al.* 1996; Banks, 2008; Bisschops *et al.*, 2009; Sadi, 2010).

Os principais motivos apontados para o uso da digestão anaeróbia por *via húmida* prendem-se, essencialmente, com o facto de a digestão anaeróbia por *via seca* necessitar de recorrer a equipamentos mais complexos, dispendiosos e de operação mais difícil (bombas, misturador, digestor anaeróbio) e a maior susceptibilidade à ocorrência de bloqueios e entupimentos e falhas no processo de digestão anaeróbia. Todos estes aspectos, listados no Quadro 6.2, vão contra os seguintes critérios, descritos na secção 11.1, a que a unidade de digestão anaeróbia a instalar na FCT/UNL tem de obedecer:

- Minimizar os *inputs* energéticos à unidade de digestão anaeróbia;
- Ser de manutenção rápida e fácil, para que o(s) operador(es) da unidade apenas necessite(m) de formação e treino elementar para que possa(m) manter a unidade;
- Operar com o mínimo de monitorização, com o intuito de ser fácil de operar e assim ocupar o menor tempo possível ao(s) operador(es);
- Ser durável, ou seja, usar equipamentos que possuam um tempo de vida longo;
- Possuir um baixo custo de manutenção;
- Possuir um baixo custo de instalação e de operação.

### **Número de Etapas**

Como fica patente através da observação da Figura 11.1, relativamente ao número de etapas no processo de digestão anaeróbia, optou-se por um reactor simples. Na secção 6.4 foi referido que, ao separar-se o processo de digestão anaeróbia por múltiplos digestores, se obtém uma maior eficiência na conversão de substrato em biogás, dado que cada digestor mantém as condições de operação ideais para cada grupo de microrganismos intervenientes em cada uma das fases da digestão anaeróbia. Optou-se, contudo, por um reactor simples, pois a existência de um único digestor diminui a complexidade, o custo, o espaço ocupado e os *inputs* energéticos fornecidos, uma vez que apenas um digestor tem de ser aquecido permitindo, desta forma, dar resposta aos critérios listados na secção 11.1, a que a unidade de digestão anaeróbia, a instalar na FCT/UNL, tem que obedecer.

A par do que foi mencionado anteriormente, todas as unidades de digestão anaeróbia instaladas à escala laboratorial e à escala piloto, na União Europeia, apontam para que seja usado apenas um digestor anaeróbio, pelos motivos apresentados anteriormente (Hessami *et al.* 1996; Banks, 2008; Bisschops *et al.*, 2009; Sadi, 2010).

### **Alimentação do Digestor**

Relativamente ao modo de alimentação do digestor e de extracção do digerido optou-se por um sistema contínuo. A escolha deste sistema prende-se com o facto de se pretender obter uma produção de biogás diária constante com a unidade de digestão anaeróbia a instalar na FCT/UNL. Através de um modo de alimentação descontínuo (*batch*) apenas seria possível obter uma produção de biogás contínua através da instalação de diversos digestores anaeróbios (*batch*) em série.

Diversos autores consideram que o modo de alimentação contínuo é o mais apropriado para valorizar os bio-resíduos alimentares sólidos em unidades de digestão anaeróbia de muito pequena e pequena escala (Hessami, *et al.* 1996; Banks, 2008; Bisschops, *et al.*, 2009; Sadi, 2010).

No modo de alimentação contínuo devem ser adicionadas, diversas vezes por dia, pequenas porções do total de bio-resíduos alimentares ao digestor anaeróbio. Por razões práticas que se prendem com a gestão diária que será feita da unidade de digestão anaeróbia, o digestor anaeróbio será alimentado diariamente em pelo menos dois momentos em separado, um de manhã e outro ao final do dia, com excepção para os fins-de-semana e feriados, dado não ocorrer alimentação ao digestor. Como ficou patente na secção 11.4, aquando da alimentação ao digestor à que garantir que a carga orgânica não ultrapassa os  $8,0 \text{ kg SV.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$ .

## **11.6. Representação Esquemática e Processual da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta**

No presente estudo foram analisadas duas alternativas diferentes para o dimensionamento da unidade de digestão anaeróbia:

1. Unidade de digestão anaeróbia equipada com unidade de pasteurização;
2. Unidade de digestão de digestão anaeróbia sem unidade de pasteurização.

A justificação para o estudo de duas alternativas prende-se com o facto de o Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, que foi detalhado na secção 1.5, prever que possam ser usadas diferentes metodologias no que toca à redução de agentes patogénicos. Esta redução pode ocorrer através da pasteurização, ou de qualquer outro método, desde que se garanta um efeito semelhante no que toca à redução destes agentes relativamente aos quantitativos apresentados na secção 1.5, do presente documento.

Através da pesquisa bibliográfica efectuada, não foi encontrada legislação nacional que regule a valorização de resíduos orgânicos através de digestão anaeróbia, para além do que foi mencionado na secção 1.3, onde se referiu que, através do Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro, as operações de valorização de resíduos estão sujeitas a autorização prévia. Deste modo, para efeito do presente dimensionamento, consideraram-se que os valores limites para os agentes patogénicos presentes no digerido que sai da unidade de digestão anaeróbia são os expressos pelo Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, o qual foi detalhado na secção 1.5.

Diversos estudos de unidades de digestão anaeróbia mesofílicas instaladas à escala laboratorial ou piloto, para valorizarem bio-resíduos alimentares, permitiram concluir que, na ausência de qualquer etapa de pasteurização, a digestão anaeróbia mesofílica não permite reduzir os agentes patogénicos até valores inferiores aos detalhados no Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro (MREC, 2000; Banks, 2008). Assim, na segunda alternativa proposta para a unidade de digestão anaeróbia em causa, que não inclui uma unidade de pasteurização, outro método tem de ser aplicado para que os valores dos agentes patogénicos apresentados pelo digerido se encontrem dentro dos limites estabelecidos pelo regulamento referido. A solução que se apresenta para a alternativa 2 diz respeito ao armazenamento de longa duração do digerido, por um período de tempo suficiente até que os valores dos agentes patogénicos sejam inferiores aos limites estabelecidos no mesmo regulamento.

As Figuras 11.2 e 11.3 apresentam os diagramas de processo das duas alternativas propostas para os equipamentos que compõem a unidade de digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares da FCT/UNL. Estes diagramas de processo são complementados com as Figuras 11.4 e 11.5, que para além de ilustrarem os equipamentos que compõem os dois processos propostos, apresentam também algum detalhe dos órgãos de ambos os processos.

Posto isto apresentam-se os diagramas de processo.

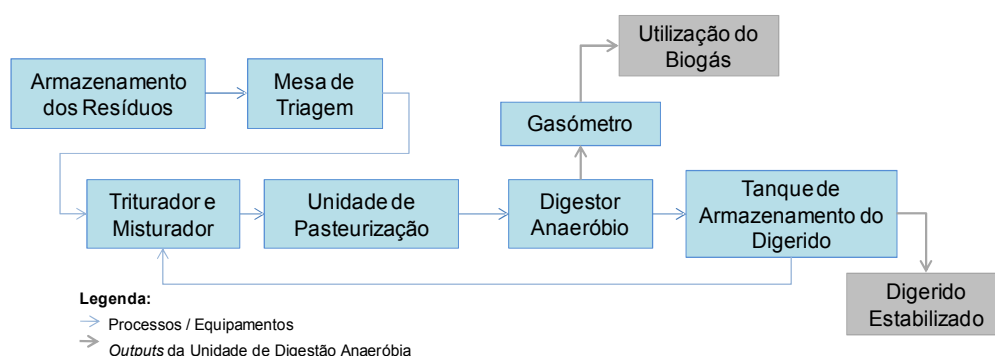


Figura 11.2 – Diagrama de processo da unidade de digestão anaeróbia proposta com uma unidade de pasteurização (Alternativa 1)

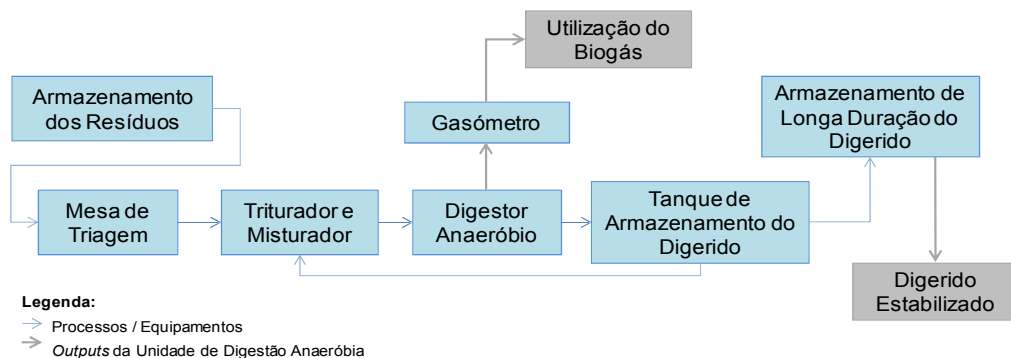


Figura 11.3 - Diagrama de processo da unidade de digestão anaeróbia proposta com um armazenamento de longa duração para o digerido (Alternativa 2)

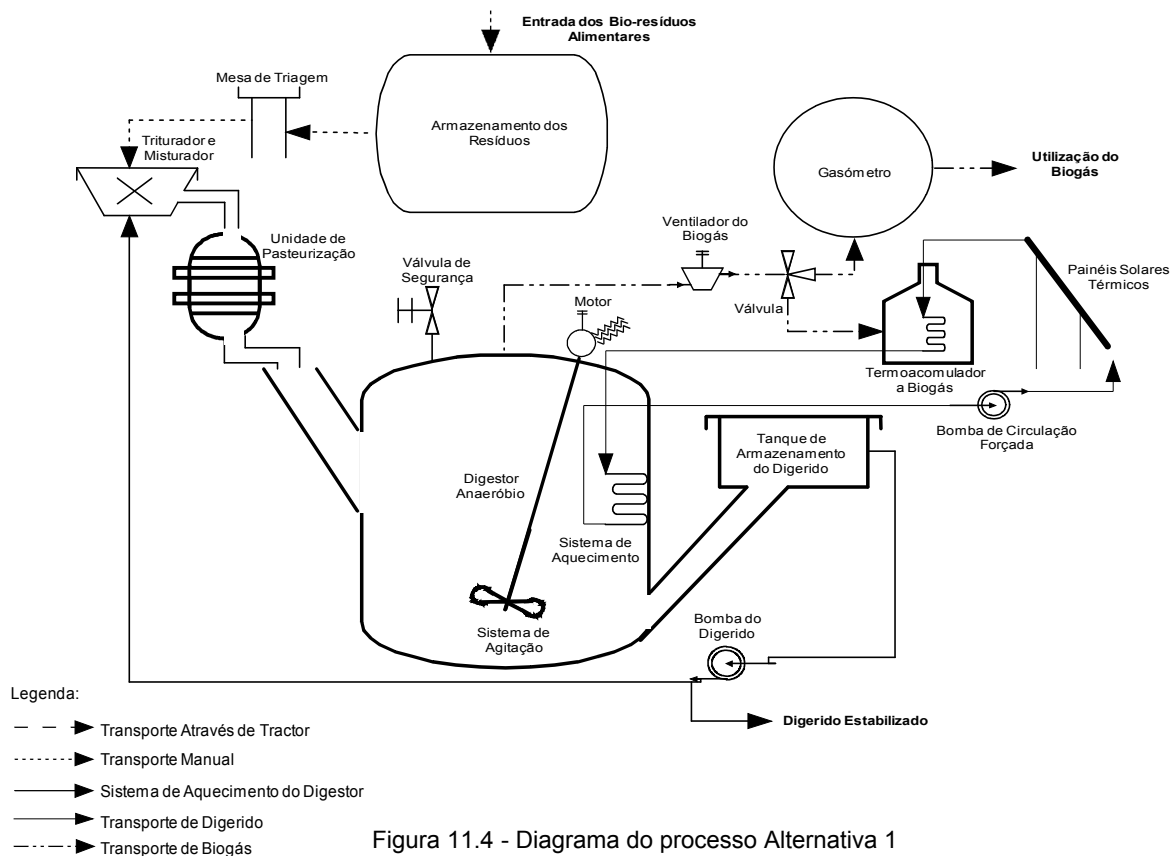


Figura 11.4 - Diagrama do processo Alternativa 1

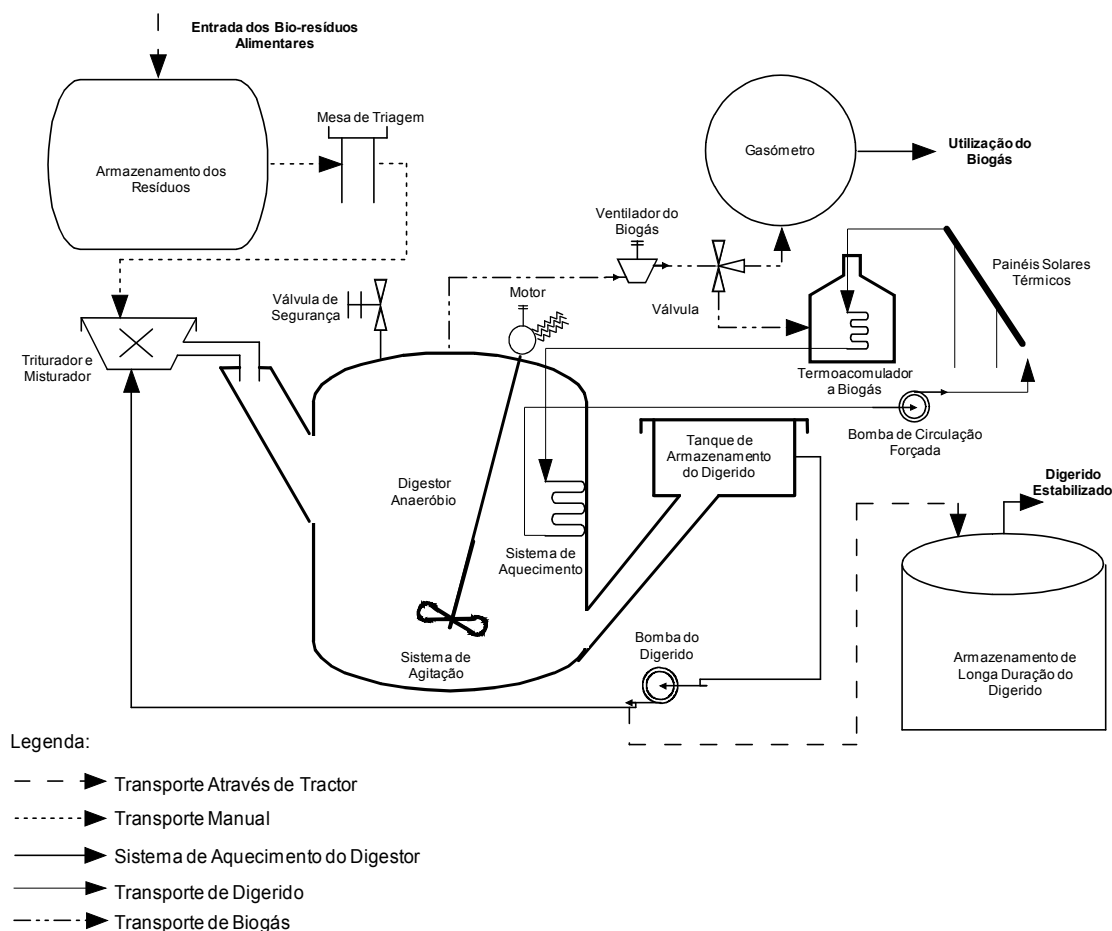


Figura 11.5 - Diagrama do processo Alternativa 2

Tanto as representações esquemáticas como os diagramas de processo apresentados nas Figuras 11.2 a 11.5, resultam da análise de diversos estudos nesta área (Mata-Alvarez, *et al.*, 1991; Hessami, *et al.* 1996; Kossmann *et al.*, 1997; Banks, 2008; Seadi, *et al.* 2008; Bisschops, *et al.*, 2009; Vandevivere, *et al.*, 2001; Sadi, 2010; Riuji, 2009; Gyalpo, 2010; [www.adelaide.edu.au](http://www.adelaide.edu.au)).

A unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL, independentemente das alternativas 1 ou 2 que foram apresentadas nas Figuras 11.2 a 11.5, deve ser dividida em duas áreas distintas: área limpa e área não limpa. Esta separação visa dar cumprimento a toda a legislação no que toca ao armazenamento dos bio-resíduos alimentares expressa no Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro, no Decreto-Lei n.º 67/98, de 18 de Março e no Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, que estabelecem as regras a que estão sujeitas as unidades de digestão anaeróbia de valorização bio-resíduos alimentares.

Esta separação entre área limpa e não limpa tem por objectivo evitar que ocorra a contaminação entre os resíduos e o digerido tratado e não tratado. Deste modo, na área limpa da alternativa 1 está presente substracto que sai da unidade de pasteurização e, na alternativa 2, o digerido que sai do armazenamento de longa duração.

Na área não limpa da alternativa 1 encontra-se o substrato que ainda não deram entrada na unidade de pasteurização e, na alternativa 2, todos os equipamentos da unidade de digestão anaeróbia até ao armazenamento de longa duração. A separação entre a área limpa e não limpa deverá ser executada idealmente através de uma separação física como, por exemplo, uma parede (Bisschops *et al.*, 2009). A área não limpa da unidade de digestão anaeróbia deverá ser de fácil limpeza e desinfecção.

A disposição dos equipamentos na unidade da digestão anaeróbia deverá ser efectuada com o intuito de facilitar o transporte dos produtos entre os diversos equipamentos sendo que, quanto mais próximos estes equipamentos estiverem uns dos outros, mais fácil será esse transporte. No entanto e ao mesmo tempo, a separação entre a área limpa e não limpa deverá ser respeitada e deverá existir espaço suficiente para que as pessoas e os materiais se movam de forma fácil e segura (Bisschops *et al.*, 2009).

## **12. Descrição do Processo e dos Equipamentos**

Na presente secção irão ser especificadas as características técnicas e a respectiva dimensão de todos os equipamentos incluídos nas duas alternativas para a unidade de digestão anaeróbia proposta (Figuras 11.4 e 11.5). Todos os equipamentos descritos em seguida têm por objectivo cumprir os critérios que a unidade de digestão anaeróbia em causa deve satisfazer e que foram definidos no início da secção 11.1 da presente dissertação.

### **12.1. Armazenamento dos resíduos**

Como foi referido na secção 1.3, o armazenamento de bio-resíduos alimentares tem de obedecer às normas definidas no Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro e no Decreto-Lei n.º 67/98, de 18 de Março.

O local de armazenamento dos bio-resíduos alimentares tem de ser dimensionado em função da produção máxima diária expectável e do número de dias de armazenamento máximo dos resíduos. Relativamente à produção máxima diária deste tipo de resíduos considera-se que esta seja de cerca 300 kg atendendo a que, através da estimativa 1, patente na secção 11.2, se obteve uma produção máxima diária de 278,9 kg para o período de Estudo / Exames (Quadros 10.9 e 11.1). Relativamente ao número de dias máximo que os bio-resíduos alimentares podem ser armazenados, considera-se que o mesmo é de três dias (Hessami *et al.* 1996; Banks, 2008), dado que os bio-resíduos alimentares possuem uma elevada biodegradabilidade.

Tendo em conta a produção máxima de bio-resíduos alimentares de 300 kg por dia e um tempo máximo de armazenamento de três, o local de armazenamento dos bio-resíduos alimentares tem de possuir um volume de 1,8 m<sup>3</sup> considerando uma massa específica de 500 kg.m<sup>-3</sup>, definida na secção 10.6. No que respeita à tipologia do local de armazenamento dos bio-resíduos alimentares, este deve ser fechado, para dar cumprimento à legislação em vigor, poderá possuir a forma de um tanque cilíndrico e ser feito a partir de diversos materiais como alvenaria, polietileno e metal. Este local de armazenamento deverá possuir uma “escotilha” superior para que os bio-resíduos alimentares possam ser introduzidos e uma escotilha colocada na parte inferior para que os bio-resíduos alimentares saiam do mesmo. Com este modelo de local de armazenamento garante-se que os bio-resíduos alimentares, que estão armazenados há mais tempo na unidade de digestão anaeróbia, são consumidos.

### **12.2. Equipamentos de pré-tratamento dos resíduos**

Os equipamentos que são apresentados de seguida têm por objectivo dar cumprimento à legislação em vigor no que toca à valorização, através de digestão anaeróbia, dos bio-resíduos alimentares e ainda preparar e colocar estes resíduos nas condições ideais para que possam maximizar a produção de biogás e serem valorizados sem causarem problemas à unidade de digestão anaeróbia proposta.

## Mesa de Triagem

Devido à tipologia de resíduos que a unidade de digestão anaeróbia vai valorizar, é imperativo que exista uma triagem dos bio-resíduos no início do processo de digestão anaeróbia.

Apesar da formação, fornecida aos colaboradores dos estabelecimentos de restauração, sobre o tipo de resíduos a separar, como mencionado na secção 11.3, diversos tipos de “contaminantes” podem acompanhar os bio-resíduos alimentares. Os “contaminantes” mais frequentes são restos de embalagens compostos por diversos tipos de plásticos, metal e vidro (Seadi *et al.* 2008). A Figura 12.1 ilustra alguns dos principais “contaminantes” que acompanham os bio-resíduos alimentares.



Figura 12.1– “Contaminantes” dos bio-resíduos alimentares (Seadi *et al.* 2008)

Durante o processo de triagem dos bio-resíduos alimentares, deverá ser dada especial atenção aos contentores de recolha dos mesmos colocados nos diversos locais acessíveis a todos os alunos e pessoal docente e não docente, dado que a probabilidade de estes contentores conterem outros tipos de resíduos é mais elevada que nos sacos de recolha disponibilizados pelos diversos espaços comerciais abrangidos, pois como foi referido irá ser fornecida formação aos colaboradores destes espaços para otimizar o processo de separação dos bio-resíduos alimentares.

A triagem dos bio-resíduos tem por objectivo evitar a ocorrência de entupimentos por matérias não degradáveis, a danificação dos equipamentos das unidades pelos mesmos e a ocupação do volume do digestor anaeróbio por materiais inertes. Existem diversos tipos de métodos para realizar a triagem dos resíduos: mecânicos, magnéticos e manuais (Seadi *et al.*, 2008). Devido à quantidade de bio-resíduos alimentares a valorizar diariamente (125 kg), o método de triagem escolhido foi o manual, dado que os métodos de triagem mecânicos e magnéticos são aplicáveis a unidades de digestão anaeróbia centralizadas.

A triagem manual dos bio-resíduos alimentares será efectuada por um colaborador numa mesa de triagem. Esta triagem será do tipo negativa, pois o colaborador irá remover os materiais indesejados, colocando-os num contentor de RSU; na mesa apenas ficará o material fermentável a usar na unidade de digestão anaeróbia. A mesa de triagem terá de ser metálica, possuir 4 pés, uma altura aproximada de 1 metro e uma área de 2 m<sup>2</sup>; deverá ainda possuir um rebordo de aproximadamente 20 cm de altura, em 3 dos lados da mesa.



### **Triturador e Misturador**

A trituração e mistura dos bio-resíduos alimentares ocorre no mesmo equipamento, no qual ainda é aferido o teor de sólidos totais presentes nos resíduos, antes de darem entrada no digestor anaeróbio. Na secção 1.5., do presente documento, e através do Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, foi referido que a dimensão máxima das partículas, após saída da unidade de digestão anaeróbia, deve de ser de 12 mm. A par desta obrigação legal, a dimensão das partículas que dão entrada na unidade de digestão anaeróbia afecta as transformações biológicas e o dimensionamento do equipamento. Partículas de dimensões superiores a 12 mm demoram mais tempo a serem decompostas do que partículas de dimensão inferior a 12 mm pelo que, ao reduzir a dimensão das partículas, aumenta-se a área de superfície das mesmas (Hilkiah *et al.*, 2008). A redução do tamanho das partículas apenas diminui o tempo em que as partículas são digeridas, não aumentando necessariamente a produção de biogás (Seadi *et al.* 2008). A redução do tamanho das partículas pode ser obtida por trituração ou por moagem.

A aferição do teor de sólidos totais nos bio-resíduos alimentares ocorre através da “diluição” dos bio-resíduos, dado que a unidade de digestão anaeróbia em causa irá funcionar através da *via húmida*. A “diluição” dos bio-resíduos alimentares irá ser realizada através de uma parte da fracção líquida do digerido que sai do digestor anaeróbio (secção 11.5).

Atendendo ao teor de sólidos totais dos bio-resíduos alimentares que é, em média, de 25%, como foi mencionado na secção 11.2, e para que seja possível realizar a digestão anaeróbia por *via húmida* com um teor de sólidos totais de 14% (secção 11.5), tem de se adicionar aproximadamente 0,147 m<sup>3</sup> da fracção líquida do digerido aos 125 kg de bio-resíduos alimentares a adicionar ao digestor por dia, considerando que a mesma possui um teor de sólidos totais de 5% e uma densidade de 1040 kg.m<sup>-3</sup> (Anasruron *et al.*, 2010). Deste modo, o volume total de bio-resíduos alimentares a valorizar na unidade de digestão anaeróbia passará a ser de 0,397 m<sup>3</sup>.

Atendendo ao volume de bio-resíduos alimentares a valorizar diariamente na unidade de digestão anaeróbia, este equipamento poderá possuir uma dimensão de 0,45 m<sup>3</sup>. O equipamento em análise deverá possuir uma tampa na sua parte superior com o intuito de permitir que os bio-resíduos alimentares, que provêm da mesa de triagem, sejam introduzidos no seu interior. A fracção líquida do digerido irá dar entrada neste tanque através da bombagem através de uma tubagem que ligará directamente o tanque de armazenamento do digerido ao tanque de recepção e mistura. A trituração dos bio-resíduos alimentares pode ser realizada através de lâminas de corte instaladas no fundo deste equipamento (Bisschops *et al.*, 2009). Como resultado da trituração dos resíduos ocorre a mistura dos mesmos com o digerido recirculado que dá entrada neste equipamento.

A mistura dos bio-resíduos alimentares com o digerido é encaminhada por uma tubagem, através de uma válvula instalada no fundo deste equipamento que, pela acção da gravidade, encaminha a

mistura directamente para o digestor anaeróbio na alternativa 2 e para a unidade de pasteurização na alternativa 1.

### **Alternativa 1 - Unidade de Pasteurização**

Como fica patente através da observação das Figuras 11.2 e 11.4, na alternativa 1, antes dos bio-resíduos alimentares darem entrada no digestor anaeróbio, estes passam pela unidade de pasteurização de acordo com o definido no Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro. Este regulamento, que foi aprofundado na secção 1, estabelece as seguintes características que a unidade de pasteurização tem de cumprir:

- Temperatura mínima no interior da unidade: 70° C;
- Tempo de permanência mínimo, sem interrupções, no interior da unidade: 60 minutos.

A colocação da unidade de digestão anaeróbia logo a seguir ao triturador e misturador e antes do digestor anaeróbio, para além de ser a metodologia mais apropriada no que toca à estabilização deste tipo de resíduos (Bisschops *et al.*, 2009), possibilita ainda dar cumprimento ao Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro. A colocação da unidade de pasteurização neste local, possibilita ainda aquecer o digestor anaeróbio, pois, o substracto dá entrada no digestor anaeróbio quente.

A unidade de pasteurização deverá possuir um volume mínimo de 200 litros com o intuito de tratar os 0,397 m<sup>3</sup> que saem do triturador e misturador por dia. O dimensionamento da unidade de pasteurização teve em consideração que a alimentação ao digestor anaeróbio irá ser efectuada em dois momentos do dia, como ficou patente na secção 10.5.

### **12.3. Digestor Anaeróbio**

Na Secção 6.1 de presente dissertação foi efectuada uma caracterização geral do digestor anaeróbio onde se mencionou que este equipamento constitui o órgão central de uma unidade de digestão anaeróbia, por ser onde ocorre a produção do biogás através da valorização dos resíduos. Nessa secção foram identificados todos os requisitos mínimos de construção que os digestores anaeróbios deveram atender, independentemente da dimensão, do tipo de resíduo a valorizar e das condições de operação.

O digestor anaeróbio proposto para o *Campus* da FCT/UNL foi desenvolvido com o intuito de satisfazer todos esses requisitos de construção. A par de todos os requisitos estruturais identificados na secção 6.1, a tipologia escolhida para o digestor anaeróbio a instalar, nas duas alternativas consideradas no presente estudo, resulta das condições de funcionamento seleccionadas na secção 11.5 e das características dos bio-resíduos alimentares a valorizar.

Devido ao facto de o regime de alimentação ao digestor ser contínuo, e como foi mencionado na secção 11.5, a redução do teor de sólidos totais dos bio-resíduos alimentares ser realizada através da fracção líquida do digerido, propõe-se uma tipologia para o digestor anaeróbio semelhante ao digestor anaeróbio de contacto.

Optou-se por esta tipologia devido ao sistema de agitação e mistura que será instalado no digestor anaeróbio e à recirculação da fracção líquida do digerido que possibilita que a mesma actue como inoculo e evita a perda de biomassa do digestor. A recirculação da fracção líquida do digerido aumenta o rendimento do digestor anaeróbio pois são reintroduzidas bactérias fermentativas que vão acelerar a etapa da hidrólise no processo de digestão anaeróbia (Bisschops *et al.*, 2009).

No que toca à forma que o digestor anaeróbio irá possuir, diversos autores sugerem que para um digestor de pequena escala e com o intuito de se minimizar o custo de instalação e o espaço ocupado pela unidade, e de maximizar o período de vida da unidade, a forma do digestor anaeróbio deverá ser semelhante ao usado no modelo chinês desenvolvido na secção 7.1, do presente documento. Um digestor anaeróbio com este formato potencia o requisito de construção que todos os digestores anaeróbios devem possuir e que foi apresentado na secção 6.1., referente à minimização da área superficial do digestor graças à forma hemisférica que a cobertura e a base do digestor apresentam.

Relativamente aos materiais de construção do digestor anaeróbio, estes têm de dar resposta aos requisitos construtivos apresentados na secção 6.1. O material escolhido para a construção do digestor anaeróbio foi o betão. A escolha deste material recaiu no facto da construção do mesmo possuir um preço reduzido e um tempo de vida longo (Kossmann *et al.*, 1997). Na construção de um digestor anaeróbio de betão há que ter cuidados especiais para garantir a estanquicidade, devendo usar-se revestimento e/ou vedantes especiais para que fique estanque. Os problemas mais comuns com este tipo de digestores prendem-se com o aparecimento de fissuras que, no caso de não serem reparadas, podem levar a ocorrência de fugas. Para melhorar o isolamento do digestor, este deverá possuir uma camada de isolamento térmico que permita minimizar as perdas térmicas do sistema. Para isolar um digestor anaeróbio podem ser utilizadas diferentes soluções de construção: construção parcial do digestor abaixo do nível do solo, utilização de paredes duplas com caixa-de-ar e aplicação de materiais de origem sintética como o poliuretano, o poliestireno e outros polímeros, ou ainda com materiais de origem natural como lã de vidro, lã de rocha, argilas, entre outras (CCE, 2000).

Com o intuito de garantir um melhor isolamento e de facilitar o movimento dos resíduos na unidade de digestão anaeróbia, o digestor anaeróbio a instalar na unidade de digestão anaeróbia do *Campus* da FCT/UNL irá ficar enterrado, à semelhança de um digestor anaeróbio do modelo chinês, com a diferença para a cúpula do digestor que estará acima do solo, a par do tanque de armazenamento do digerido. Para evitar perdas térmicas, a cúpula do digestor deverá possuir um isolamento de 10 cm de poliuretano.

No que toca à entrada dos resíduos no digestor, esta será efectuada através de um tubo de entrada. A saída do digerido ocorrerá da mesma forma que num digestor anaeróbio do modelo chinês, pelo que, será efectuada por um tubo de saída ligado ao tanque de armazenamento do digerido.

## Volume do digestor

O volume mínimo de um digestor anaeróbio é dado em função do volume de resíduo a valorizar por unidade de tempo e do tempo de retenção hidráulico (DGS, Ecofys, 2005):

$$V_{\min} = VT \times \frac{TRH}{PF} \quad [\text{Eq. 12.1}]$$

Em que:

$V_{\min}$  – Volume mínimo do digestor anaeróbio ( $\text{m}^3$ );

VT – Volume total de resíduos a valorizar por ano ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ );

TRH – Tempo de Retenção Hidráulico (dias);

PF – Período de Funcionamento ( $\text{dias} \cdot \text{ano}^{-1}$ ).

O volume total de resíduos a valorizar por ano ( $88,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ) obteve-se através da multiplicação do número total de dias de alimentação do digestor ( $224 \text{ dias} \cdot \text{ano}^{-1}$ ), pelo volume diário de substracto a alimentar ( $0,397 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ). Atendendo ao TRH pretendido de 40 dias, tal como foi seleccionado na secção 10.5, ao volume total de resíduos a valorizar anualmente e ao período de funcionamento da unidade de digestão anaeróbia de 334 dias, através da aplicação da Equação 12.1 determina-se que o volume mínimo do digestor anaeróbio, a instalar no *Campus* da FCT para valorizar diariamente 125 kg de bio-resíduos alimentares, é de  $10,65 \text{ m}^3$ .

Dado que o formato escolhido para o digestor anaeróbio é semelhante ao modelo chinês, o volume do digestor anaeróbio deve conter algum espaço livre na sua cúpula para que o biogás possa ficar retido na mesma e, deste modo, o digestor deverá possuir um volume extra de 10% ([www.adelaide.edu.au](http://www.adelaide.edu.au)). Assim, o volume final do digestor a instalar deverá ser de  $11,71 \text{ m}^3$ .

## Sistema de Agitação e Mistura do Digestor

Optou-se por um digestor anaeróbio com um sistema de mistura integrado pois, como ficou patente na secção 5.3, a mistura de um digestor anaeróbio contribui para o aumento do rendimento da reacção dado que evita a acumulação de uma camada flutuante na parte superior do digerido e promove a libertação do biogás e a distribuição uniforme da temperatura no interior do digestor.

No que respeita ao sistema de agitação e mistura para digestores anaeróbios, de pequena escala, que valorizam bio-resíduos alimentares por *via húmida*, um sistema descontínuo de mistura possui vantagens para o processo de digestão anaeróbia, caso o conteúdo do digestor seja agitado por um curto período de tempo, a cada quatro horas (Wellinger, 1999; Kossmann *et al.*, 1997; Bisschops *et al.*, 2009). Como foi mencionado na secção 5.3, existem diversos tipos de sistemas de agitação e mistura para um digestor anaeróbio. A agitação mecânica através de um misturador de hélice instalado verticalmente é o método mais usado para digestores desta escala, dado ser o mais eficiente no que toca à agitação do digestor atendendo à dimensão do mesmo. (Banks, 2008; Bisschops *et al.*, 2009).

Assim, a unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL irá possuir um digestor anaeróbio agitado mecanicamente através de um misturador de hélice. Este misturador irá ser accionado por um motor eléctrico, durante aproximadamente 15 minutos, de 4 em 4 horas, instalado

na cobertura do digestor. Aquando da instalação do sistema de mistura e em particular do eixo que liga o motor à hélice, há que garantir que a cobertura se mantém estanque, dado que, como foi mencionado anteriormente, parte do biogás irá ser armazenado na cobertura do digestor.

### **Sistema de Aquecimento do Digestor Anaeróbio**

Como foi referido na secção 11.4, a temperatura de operação do digestor anaeróbio escolhida foi de 35°C (gama mesofílica). É imperativo que a temperatura do digestor se mantenha constantemente nos 35°C (Gray *et al.*, 2008), sendo a variação máxima de temperatura admissível no digestor anaeróbio, nesta gama de temperatura, de  $\pm 1^\circ\text{C.h}^{-1}$  (Kossmann *et al.*, 1997).

Atendendo ao volume do digestor anaeróbio a instalar no *Campus* da FCT/UNL, o melhor sistema para aquecer o digestor é o sistema de aquecimento através de tubagens instaladas no interior do mesmo (Banks, 2008; Bisschops *et al.*, 2009). O calor que é necessário aplicar ao digestor anaeróbio varia em função da temperatura de funcionamento do mesmo, da temperatura e quantidade dos resíduos que dão entrada no digestor, da temperatura exterior e do isolamento do digestor (DGS, Ecofys, 2005). Deste modo, a estimativa das necessidades térmicas de um digestor anaeróbio pode ser efectuada através do somatório do calor necessário para igualar a temperatura do resíduo com a temperatura do digestor anaeróbio e do calor necessário para compensar as perdas térmicas que ocorrem pelas paredes, topo e fundo do digestor anaeróbio (Metcalf, 2003).

A equação seguinte traduz o calor que é necessário aplicar ao digestor anaeróbio para compensar o calor perdido, ao fazer igualar a temperatura dos bio-resíduos alimentares com a temperatura do digestor anaeróbio (DGS, Ecofys, 2005):

$$Q = M \times C \times \Delta T \quad [\text{Eq. 12.2}]$$

Em que:

Q – Calor que é necessário para igualar a temperatura dos resíduos à temperatura do digestor ( $\text{kJ.ano}^{-1}$ );

M – Massa dos resíduos a valorizar ( $\text{kg.ano}^{-1}$ );

C – Calor específico dos resíduos ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ );

$\Delta T$  – Variação de temperatura entre os resíduos que dão entrada no digestor e a temperatura do digestor ( $^\circ\text{C}$ ).

O calor específico dos bio-resíduos alimentares digeridos é aproximadamente igual ao calor específico da água, devido ao facto de serem diluídos ( $4,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ) (DGS, Ecofys, 2005). A massa total dos bio-resíduos alimentares digeridos, que sai anualmente do triturador e misturador, para ver valorizado no digestor anaeróbio é de 62,2 toneladas, considerando que a densidade do digerido é de  $1040 \text{ kg.m}^{-3}$  e dos bio-resíduos alimentares é de  $500 \text{ Kg.m}^{-3}$ . Deste modo, com base na Equação 12.2 e considerando que na alternativa 1 os bio-resíduos, após saírem da unidade de pasteurização, dão entrada no digestor anaeróbio a uma temperatura de 65°C, conclui-se que os bio-resíduos fornecem ao digestor anaeróbio  $7.840 \text{ MJ.ano}^{-1}$ , sendo este valor por cada dia útil de funcionamento da unidade de 35,0  $\text{MJ.dia}^{-1}$ .

Na alternativa 2, considerou-se que a temperatura de entrada dos bio-resíduos alimentares digeridos no digestor anaeróbio é de 17°C. Deste modo e entrando em conta com a Equação 12.2, o calor

que é necessário aplicar ao digestor anaeróbio para que o mesmo se mantenha com a temperatura de 35°C é de 4.704 MJ.ano<sup>-1</sup>, que equivale a 21,0 MJ.dia útil<sup>1</sup>.

As perdas térmicas pelas paredes, fundo e parte superior do digestor anaeróbio são calculadas com base na seguinte equação (Metcalf, 2003):

$$Q=U \times A \times \Delta T \quad [\text{Eq. 12.3}]$$

Em que:

Q – Perdas térmicas (W.h);

U – Coeficiente de transferência térmica (W.m<sup>-2</sup>.°C);

A – Área de troca térmica (m<sup>2</sup>);

ΔT – Variação de temperatura entre interior e o exterior do digestor (°C.h).

Para que seja possível calcular as perdas térmicas pela envolvente do digestor tem de se calcular primeiro a sua área superficial. A forma do digestor anaeróbio, descrita na secção 12.2, é cilíndrica, com o topo e a cobertura em forma hemisférica para minimizar a área superficial do digestor e maximizar o seu volume. Com o intuito de se evitarem as perdas térmicas, todo o digestor, com excepção da sua cúpula, estão enterrados. Através de um diâmetro de 2,5 metros para o interior do digestor, obteve-se uma área superficial abaixo e acima do solo de 18,1 m<sup>2</sup> e 9,8 m<sup>2</sup>, respectivamente, que perfaz um volume de 11,71 m<sup>3</sup>.

Relativamente ao coeficiente de transferência térmica o mesmo apresenta o valor de 0,65 (W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>) para a parte enterrada do digestor, considerando que tanto as paredes laterais como o fundo em betão, estão em contacto com solo seco (Martins, 2009). A cúpula do digestor, uma vez que está acima do solo, possui um coeficiente de transferência térmica de 1,4 (W.m<sup>-2</sup>.°C), considerando que a cúpula é construída em betão com um isolamento de 10 cm de poliuretano (Martins, 2009).

A temperatura média do ar e do solo para o campus da FCT/UNL é de 17°C e 18,8°C, respectivamente (www.meteo.pt). Dispondo já de todos os dados necessários para aplicar a Equação 12.3, calculou-se as perdas térmicas para a parte do digestor acima e abaixo do solo, obtendo-se os valores de 247,3 W.h e 190,4 W.h, respectivamente. Ao efectuar-se a soma das perdas térmicas da parte do digestor acima e abaixo do solo, obteve-se as perdas térmicas totais do digestor anaeróbio para calcular as perdas térmicas pela envolvente do digestor anaeróbio, com o valor de 437,7 W.h, que corresponde a uma perda total diária de 10,5 kWh.dia<sup>-1</sup> ou 37,8 MJ.dia<sup>-1</sup>.

Aos fins-de-semana e feriados, devido ao facto de o digestor não ser alimentado por resíduos, o calor que é necessário aplicar ao digestor anaeróbio é igual às perdas térmicas que o digestor possui pela sua envolvente (37,8 MJ.dia<sup>-1</sup>).

Nos dias úteis, ou seja quando ocorre alimentação ao digestor, as necessidades térmicas do digestor anaeróbio, calculam-se através da soma das perdas térmicas pela sua envolvente, com o calor que é necessário aplicar, para compensar o calor perdido ao fazer igualar a temperatura dos bio-resíduos alimentares com a temperatura do digestor anaeróbio. Deste modo, obteve-se um valor

estimado das necessidades térmicas, nos dias úteis de,  $2,8 \text{ MJ.dia}^{-1}$  na alternativa 1 e  $58,8 \text{ MJ.dia}^{-1}$  na alternativa 2.

Ao entrar em conta com as necessidades térmicas do digestor anaeróbio, nos fins-de-semana e feriados e nos dias úteis da semana, obteve-se um valor total estimado anual de  $4.791,3 \text{ MJ.ano}^{-1}$  na alternativa 1 e  $17.335,4 \text{ MJ.ano}^{-1}$  na alternativa 2.

### **Equipamentos escolhidos para aquecer o digestor anaeróbio**

Para se fornecer os  $4.791,3 \text{ MJ.ano}^{-1}$ , na alternativa 1, e os  $17.335,4 \text{ MJ.ano}^{-1}$ , na alternativa 2, de calor que constituem as necessidades térmicas médias do digestor anaeróbio a instalar o *Campus* da FCT/UNL, optou-se por se recorrer a um sistema de colectores solares térmicos pois, segundo (Martins, 2009), estes constituem uma das melhores soluções para unidades de digestão anaeróbia com estas características.

O sistema de colectores solares térmicos irá aquecer água a uma temperatura constante e irá aquecer o digestor através de um permutador de calor instalado no seu interior.

O dimensionamento do sistema de colectores solares térmicos é divergente na alternativa 1 e 2 da unidade de digestão anaeróbia, devido às diferentes necessidades térmicas de cada uma das alternativas. Deste modo na alternativa 1 o sistema de colectores solares térmicos foi dimensionado com o intuito de suprir as necessidades de aquecimento do digestor durante os fins-de-semana e feriados, quando não estão a ser introduzidos resíduos no digestor, que são de  $37,8 \text{ MJ.dia}^{-1}$ . A alternativa 2 do sistema de colectores solares, foi dimensionada para suprir as necessidades térmicas do digestor nos dias úteis, ou seja quando o digestor necessita de mais calor  $58,8 \text{ MJ.dia}^{-1}$ .

Para se determinar a área de colectores solares térmicos a instalar na unidade de digestão anaeróbia, começou por se calcular o caudal de água quente que é necessário para suprir as necessidades energéticas do digestor anaeróbio.

Para isso recorreu-se ao estudo efectuado em Portugal por Martins (2009), no qual se determinou que o caudal de água quente a fornecer ao digestor é de  $2,9 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  e  $4,5 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  na alternativa 1 e 2, respectivamente. Através deste mesmo estudo determinou-se que seria necessário uma área de aproximadamente 5 e  $9 \text{ m}^2$ , para a alternativa 1 e 2, respectivamente, de colectores solares térmicos de circulação forçada para fazer face as necessidades térmicas do digestor anaeróbio em questão. Segundo o mesmo estudo, a área de colectores solares apresentada anteriormente é suficiente para suprir quase a globalidade das necessidades de calor do digestor anaeróbio em qualquer época do ano, sendo apenas necessário recorrer a um termoacumulador a biogás para aquecer o digestor em situações muito pontuais, que passam por um elevado número de dias com radiação solar incidente inferior ao normal e temperaturas extremas. Deste modo, considerou-se que o sistema de colectores solares térmicos, assegura por dia, em média, 95% das necessidades de aquecimento do digestor anaeróbio.

## 12.4. Tanque de Armazenamento do Digerido

Como foi mencionado anteriormente, o tanque de armazenamento do digerido estará colocado acima do solo e será alimentado por um tubo de saída de digerido do digestor anaeróbio, à semelhança do que ocorre num digestor anaeróbio do modelo Chinês. Este tanque deverá ser tapado e possuir uma válvula inferior que permita o seu esvaziamento. A quantidade de digerido que sai do processo de digestão anaeróbia é cerca de 2% inferior à quantidade de resíduos que dá entrada no mesmo, devido ao processo de digestão anaeróbia (Kossmann *et al.*, 1997). Devido ao facto do digestor anaeróbio funcionar em regime contínuo e tendo em conta a quantidade de digerido recirculado e o tempo de armazenamento do digerido ser de 8 dias, o tanque de armazenamento do digerido deverá apresentar um volume mínimo de 3,1 m<sup>3</sup>.

A ligação entre este tanque e a unidade de trituração e mistura será efectuada através de uma tubagem para fazer a recirculação de aproximadamente 0,15 m<sup>3</sup> por dia do digerido, entre estes dois equipamentos.

## 12.5. Equipamentos de pós-tratamento do digerido

### Alternativa 2: Armazenamento de Longa Duração

Na alternativa 2, a opção para a redução dos agentes patogénicos apresentados pelo digerido passam pelo seu armazenamento por um período de tempo suficiente até que os valores dos patogénicos presentes no digerido sejam inferior aos limites estabelecidos no regulamento n.º1774/2002 (CE), de 3 de Outubro (secção 11.6). Caso o digerido de uma digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares seja armazenado por 10 dias deixa de existir *Salmonella* e, por 21 dias, *E. coli*. Ao fim de 3 meses deixa de existir *Enterococci* (Banks, 2008), pelo que o período mínimo de armazenamento do digerido, deverá ser de 3 meses (92 dias). Deste modo, o tanque de armazenamento de longa duração do digerido proveniente da digestão anaeróbia dos bio-resíduos alimentares, em regime mesofílico, deverá possuir um volume mínimo de 22,3 m<sup>3</sup>. O armazenamento de longa duração deverá ser efectuado num tanque coberto.

## 12.6. Outputs do processo de digestão anaeróbia

### 12.6.1. Digerido

#### Características do digerido produzido

O digerido constitui um dos produtos do processo de digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia retira carbono, hidrogénio e oxigénio do digerido. No entanto, nutrientes essenciais para as plantas como o azoto, potássio e fósforo, permanecem nesse produto (Kossmann *et al.*, 1997). A composição e as características do digerido são afectadas pelas condições em que ocorre a digestão anaeróbia e pelo tipo de pré-tratamento a que os resíduos são submetidos.

A aplicação directa do digerido no solo não constitui uma solução consensual. Segundo alguns autores, o digerido resultante da digestão anaeróbia por *via húmida* não é em geral adequado para ser aplicado directamente no solo, devido ao seu elevado teor de humidade e ao seu elevado conteúdo em AGV que podem ser fitotóxicos (Mata-alvarez *et al.*, 2000). No entanto segundo um estudo realizado em 2008, que pretendia comparar o efeito na utilização directa de digerido



resultante da digestão anaeróbia de diversos tipos de resíduos incluindo os bio-resíduos alimentares nos solos e a sua influência na produção/crescimento das plantas em comparação com o composto obtido a partir do digerido, permitiu concluir que apesar de o digerido não ser tão estável para as plantas como o composto, apresenta os nutrientes numa forma mais disponível para as mesmas (Fuchs, et al., 2008). É mencionado ainda que o efeito fertilizante nas plantas é notado mais cedo na aplicação do digerido do que na aplicação do composto.

Não sendo a aplicação directa do digerido no solo uma solução consensual e não sendo economicamente viável efectuar o processo de compostagem a esta escala (Bisschops, et al., 2009; Kossmann et al., 1997), a presente unidade de digestão anaeróbia foi dimensionada, considerando que o digerido é enviado para o colector municipal do Campus FCT/UNL. Na alternativa 1, devido ao facto de existir uma etapa de higienização por pasteurização na unidade de digestão anaeróbia, o digerido à saída do armazenamento temporário, pode ser enviado directamente para o colector municipal. Na alternativa 2, como ficou patente na secção 11.6, após o digerido passar por um armazenamento de longa duração, o digerido fica apto a ser enviado para o colector municipal da FCT/UNL.

#### 12.6.2. Biogás

##### Quantidade de Biogás Produzido

Para se estimar a quantidade de biogás produzido pela unidade de digestão anaeróbia, a instalar no *Campus* da FCT/UNL, recorreu-se a uma revisão bibliográfica, da qual se obteve os dados presentes no Quadro 12.1 Esta revisão bibliográfica incidiu em estudos de unidades de digestão anaeróbia instaladas à escala laboratorial e em muito pequena e pequena escala que valorizam bio-resíduos alimentares provenientes de cozinhas, de cantinas e de restaurantes através de digestão anaeróbia por *via húmida*, em condições mesofílicas, numa única etapa.

Quadro 12.1 - Quantidade de biogás produzido através de digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares

Temperatura (°C)	TRH (dias)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> SV) <sup>1</sup>	Fonte
35	-	0,40	( <a href="http://lowimpact.org">http://lowimpact.org</a> , 2011)
37	-	0,46	(MREC, 2000)
35	-	0,35	(Jørgensen, 2009)
35	40,0	0,20 – 0,50	(Riuji, 2009)
37	-	0,20 – 0,50	(Eder, Schulz, 2006)
35	58,8	0,45	(Gyalpo, 2010)
37	-	0,63	(Banks et al., 2010)
37	28,0	0,47	(Cho, Park, 1995)
35	43,0	0,27	(Cousiño, 2007)
35	40,0	0,49	(Heo et al., 2004)
35		0,51	(Climenthaga, Banks, 2008)
35	42,5	0,64	(Lohri, 2009)

Legenda: 1- m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup> de sólidos voláteis introduzidos no reactor

Atendendo aos dados apresentados no quadro anterior, estimou-se que a unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* FCT/UNL possuirá uma capacidade de produção de biogás média de  $0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ SV}$ .

Através do Quadro 10.12 obtém-se um teor médio de sólidos voláteis para os bio-resíduos alimentares de 25%, pelo que, 125 kg de bio-resíduos alimentares possuem aproximadamente 31,25 kg de sólidos voláteis a serem valorizados através de digestão anaeróbia diariamente. Assim a unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL ira produzir aproximadamente  $14,06 \text{ m}^3$  de biogás por dia.

### Composição do biogás produzido

Para se determinar a composição do biogás produzido pela unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL, recorreu-se a uma revisão bibliografia (Quadro 12.2) com base em estudos de digestão anaeróbia por *via húmida* em condições mesofílicas, numa única etapa, de bio-resíduos alimentares e a estudos de digestão anaeróbia da fracção fermentável dos RSU.

Quadro 12.2 - Composição média do biogás produzido

Tipo de Resíduo	CH <sub>4</sub> (%) <sup>1</sup>	CO <sub>2</sub> (%) <sup>1</sup>	H <sub>2</sub> O (%) <sup>1</sup>	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (%) <sup>1</sup>	N <sub>2</sub> (%) <sup>1</sup>	O <sub>2</sub> (%) <sup>1</sup>	H <sub>2</sub> (%) <sup>1</sup>	PCI (MJ.m <sup>-3</sup> )	Fonte
Bio-resíduos Alimentares	64,0									(Gray, <i>et al.</i> , 2008)
	65,0									(Jørgensen, 2009)
	56,8	41,7					0,5			(Riuji, 2009)
	62,6	37,4								(Banks, <i>et al.</i> , 2010)
	89,0								31,32	(Cousiño, 2007)
	57,0 - 70,0								21-25	(MREC, 2000)
Fracção orgânica dos R.S.U.	55,0 - 70,0	30,0 - 45,0		200-4000					20 - 25	(Verma, 2002)
	55,0 - 60,0	35,0 - 40,0	2 (20°C) -7 (40°C)	20-20.000	0-0,05	0 - 2	0 - 2	0 - 1		(Mata-Alvarez, 2000)

Legenda: 1- Percentagens em volume

Através do Quadro 12.2 obtém-se um valor médio para a composição do biogás produzido na unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL de 65% de CH<sub>4</sub>, correspondendo a um poder calorífico inferior (PCI) médio de  $23,0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  de biogás.

### 12.7. Armazenamento do biogás

Relativamente ao uso do biogás, o *design* escolhido para o digestor anaeróbio, a instalar no Campus da FCT/UNL, semelhante ao modelo chinês, influencia o modo como o biogás é produzido

e consequentemente a sua utilização. Para fazer face ao principal problema deste tipo de digestor anaeróbio, no que toca à produção de biogás e que se prende com a pressão irregular do mesmo, que como ficou patente na secção 6 varia em função da quantidade de biogás que está acumulado no interior da cúpula do digestor, irá instalar-se um gasómetro externo ao digestor. Este gasómetro tem por objectivo fazer com que a pressão do biogás seja constante e ainda dispor de uma quantidade de biogás armazenada superior, com o intuito de fazer face tanto a períodos de elevado consumo, assim como de baixo consumo.

### **Gasómetro**

Existem, genericamente, três tipos de gasómetros para armazenamento de biogás em função da pressão a que o biogás é armazenado no seu interior: baixa pressão, inferior a 50 mbar; média pressão, entre 10 a 20 bar; alta pressão, superior a 350 bar (CCE, 2000). A escolha do tipo de gasómetros depende essencialmente de dois factores: tempo de armazenamento do biogás e a pressão que os equipamentos que utilizam o biogás necessitam.

Para a unidade de digestão anaeróbia, a instalar no *Campus* da FCT/UNL, optou-se por um gasómetro de baixa pressão, pelo facto dos gasómetros de média e alta pressão necessitarem de compressores e ventiladores à saída do digestor anaeróbio, o que iria necessariamente aumentar o consumo de energia da unidade.

Tendo em conta a produção de biogás média de  $14,06 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$  (secção 12.6.2) e um período máximo de armazenamento do biogás de 3 dias para fazer face aos períodos em que o biogás não é consumido, o gasómetro deverá possuir uma capacidade de armazenamento total de aproximadamente  $42,2 \text{ m}^3$ .

Um gasómetro de baixa pressão é construído em material flexível, como polipropileno, PVC, entre outros, e pode possuir uma forma esférica ou cilíndrica, vertical ou horizontal (CCE, 2000). Dado que os gasómetros de baixa pressão devem ser colocados no exterior, por questões de segurança (CCE, 2000), os mesmos requerem, habitualmente, a construção de uma cobertura para o abrigar das intempéries, da exposição solar e de eventuais danos físicos causados por roedores e pássaros. Para além desta cobertura, o gasómetro a instalar vai estar inserido no interior de uma vedação, impedindo, deste modo, possíveis danos causados por pessoas.

Devido ao facto de um gasómetro de baixa pressão de material flexível não possuir a capacidade de, simultaneamente, alterar o seu volume e manter a pressão de gás constante no seu interior (CCE, 2000), irá recorrer-se a ventiladores que promovam o transporte do biogás até aos equipamentos de utilização.

### **Utilização do Biogás**

Relativamente à conversão do biogás em energia, são apresentadas de seguida duas alternativas para a sua valorização no *Campus* da FCT/UNL.

### **Opção 1 - Queima directa**

Segundo diversos autores, a forma mais eficiente e economicamente rentável de valorizar o biogás, produzido em unidades descentralizadas de muito pequena e pequena escala, é através da sua queima directa para aquecimento de instalações ou para a preparação de refeições em cozinhas (Bisschops, *et al.*, 2009). Deste modo, o biogás será encaminhado, através de tubagens do gasómetro da unidade de digestão anaeróbia, para a cozinha da cantina da FCT/UNL para que o mesmo seja valorizado através de queima.

### **Opção 2 - Produção de energia eléctrica através de motor-gerador**

Nesta alternativa foi estudada a valorização do biogás para produção de energia eléctrica através de um motor-gerador. A valorização do biogás produzido nas unidades descentralizadas em muito pequena e pequena escala em motores-geradores para produção de energia eléctrica, é, segundo diversos autores, a forma menos rentável, tanto em termos energéticos como económicos, devido à limitada produção diária de biogás que este tipo de unidades apresenta (MREC, 2000; Seadi *et al.*, 2008).

## **12.8. Purificação do Biogás**

Os principais constituintes do biogás são o metano, o dióxido de carbono e a água (Quadro 12.2). Na digestão anaeróbia pretende-se maximizar a produção de metano e minimizar a dos restantes constituintes do biogás. No entanto, mesmo em condições ideais, dificilmente se atingirá uma percentagem de metano superior a 85% a partir da digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares. Deste modo, as unidades de digestão anaeróbia possuem sistemas de purificação do biogás, nas quais se procede à eliminação dos gases que possam ser prejudiciais para os sistemas de valorização do biogás e, consequentemente, ao aumento da concentração do metano (Kossmann *et al.*, 1997).

Apesar de actualmente existirem técnicas de secagem do biogás para reduzir o seu conteúdo em água, aumentando assim o PCI, e de redução do seu teor de CO<sub>2</sub>, que possibilita obter um biogás com um elevado teor de CH<sub>4</sub>, estas técnicas de purificação são apenas usadas em unidades de digestão anaeróbia de grande escala, que valorizam resíduos de forma centralizada (Kossmann *et al.*, 1997).

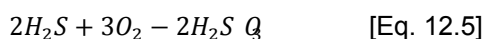
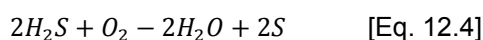
Em unidades de muito pequena escala, que valorizam resíduos de forma descentralizada, opta-se apenas por se reduzir o conteúdo do gás sulfídrico ou sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) (Seadi *et al.*, 2008). O gás sulfídrico, para além de possuir um odor extremamente desagradável, é tóxico e é corrosivo, pois forma ácido sulfúrico em combinação com o vapor de água presente no biogás. Este danifica a cúpula do digestor, as tubagens, as válvulas, o gasómetro e mesmo os motores de combustão de biogás. Estes motores são especialmente sensíveis e, em geral, admitem o fornecimento de biogás com um valor limite de H<sub>2</sub>S de 700 ppm, de modo a evitar-se a deterioração prematura deste equipamento (Kossmann *et al.*, 1997). Por todos estes motivos, mesmo em

unidades de digestão anaeróbia de pequenas dimensões, diversos autores recomendam que se reduza o conteúdo do  $H_2S$  presente no biogás (Seadi, *et al.* 2008; Kossmann *et al.*, 1997; Bisschops, *et al.*, 2009).

Para que a concentração do gás sulfídrico possa ser reduzida em unidades de pequena escala, existem essencialmente duas técnicas que são apresentadas seguidamente (Seadi *et al.*, 2008):

1. Absorção do  $H_2S$  em hidróxido de ferro hidratado ( $Fe(OH)_3$ );
2. Remoção do  $H_2S$  através de oxidação.

Destas duas técnicas, a mais utilizada em unidades de digestão anaeróbia de pequena escala é a oxidação. A oxidação baseia-se na injeção de ar numa proporção de 2 a 8% da produção de biogás na cúpula do digestor. O oxigénio presente no ar oxida o gás sulfídrico através das seguintes reacções químicas (Seadi *et al.*, 2008):



O ar pode ser injectado na cúpula do digestor através de compressores de pequena dimensão e toda a reacção de oxidação do  $H_2S$  ocorre na cúpula do digestor anaeróbio (Seadi *et al.*, 2008).

### **12.9. Transporte de materiais entre os diversos equipamentos que compõem a unidade de digestão anaeróbia**

A tipologia de transporte dos materiais pelos diversos equipamentos que compõem a unidade de digestão anaeróbia é resultado do *design* da unidade de digestão anaeróbia apresentada nas Figuras 11.4, 11.5, dos equipamentos escolhidos e da disposição dos mesmos, que foi efectuada com o objectivo de dar cumprimento à separação entre a área limpa e não limpa e de diminuir os *inputs* energéticos resultantes do transporte dos materiais entre os diversos equipamentos.

O transporte dos bio-resíduos é efectuado manualmente entre o local de armazenamento, a mesa de triagem, o triturador/misturador. Entre o triturador / misturador o pasteurizador (alternativa 1) e o digestor anaeróbio, o transporte é efectuado por gravidade, dado que o pasteurizador digestor anaeróbio está a um nível inferior em relação a este equipamento. O digerido é bombeado entre o local de armazenamento temporário do digerido e o triturador/misturador. Na alternativa 1 como ficou patente na secção 12.6.1 o digerido é enviado do tanque de armazenamento temporário para o colector municipal. Na alternativa 2, o digerido é bombeado do local de armazenamento temporário, com uma periodicidade semanal, através da mesma bomba que realiza a recirculação do digerido, para uma cisterna transportada por um tractor pertencente à FCT/UNL. Este tractor encaminha o digerido para o armazenamento de longa duração, e depois do processo de estabilização ter ocorrido o digerido é colocado no colector municipal da FCT/UNL.

### 12.10. Start-up

O processo de *start-up* de uma unidade de digestão anaeróbia é um processo complexo que envolve diversas etapas (Seadi *et al.*, 2008). Antes de se iniciar o processo de *start-up* há que garantir que todos os equipamentos da unidade de digestão anaeróbia estão a funcionar de forma correcta, sem fugas ou bloqueios e, para isso, procede-se ao enchimento do digestor e restantes equipamentos com água.

Para que o processo de *start-up* ocorra de forma rápida e fácil é essencial utilizar um inóculo, de elevada qualidade, que provenha de uma unidade de digestão anaeróbia em funcionamento e que possua as mesmas especificidades no que toca aos parâmetros de reacção e tipo de resíduo a valorizar que a unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL (Bisschops *et al.*, 2009). Na ausência do inóculo descrito anteriormente, podem igualmente ser usadas lamas de ETAR ou estrume de animais, embora, nestes casos, o processo de arranque da actividade metanogénica seja mais demorado (Bisschops *et al.*, 2009). Materiais resultantes de processos não metanogénicos, como o composto, não devem ser usados como inóculo inicial num digestor anaeróbio, devido ao facto de não possuírem os microrganismos apropriados para que possam ocorrer as diversas etapas do processo de digestão anaeróbia, nomeadamente os microrganismos metanogénicos que são estritamente anaeróbios (Bisschops *et al.*, 2009).

Durante o processo de *start-up*, as condições óptimas para o desenvolvimento das bactérias metanogénicas devem ser mantidas no interior do digestor e, para isso, a concentração dos AGV deve ser mantida a níveis baixos. A carga orgânica do digestor anaeróbio deve assim ser reduzida durante o processo de *start-up* para potenciar o desenvolvimento das bactérias metanogénicas. Deste modo, durante o processo de *start-up* de um digestor anaeróbio é essencial realizar uma monitorização do pH e da concentração dos AGV (Bisschops *et al.*, 2009).

### 12.11. Segurança

Na construção e na operação de uma unidade de digestão anaeróbia devem ser acautelados diversos aspectos de segurança com o intuito de se evitarem potenciais riscos para pessoas, animais e ambiente. Os riscos mais relevantes, decorrentes da tipologia de actividades destas unidades, são (Seadi *et al.*, 2008):

- Risco de Explosão e de Incêndio – O biogás é um gás combustível, que possui potencial explosivo. Em condições de mistura entre o biogás e o ar, numa proporção de 5 a 12% de biogás, o poder explosivo aumenta sendo apenas necessário uma fonte de ignição com uma temperatura mínima de 600°C para iniciar uma explosão (Kossmann *et al.*, 1997). Em condições normais de operação, o risco de explosão e de incêndio é superior aquando do enchimento do gasómetro, quando o biogás se encontra misturado com grandes quantidades de ar (Kossmann *et al.*, 1997). No interior da unidade de digestão anaeróbia e na sua envolvente é proibido fazer fogo ou fumar, sendo o risco destas actividades particularmente elevado junto do gasómetro e do digestor anaeróbio (Seadi *et al.*, 2008).

- Risco de envenenamento e asfixia – Se o biogás for inalado em elevada concentração pode resultar em sintomas de envenenamento ou de asfixia que podem inclusivamente conduzir à morte.

A presença de sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) no biogás não tratado pode ser extremamente tóxico mesmo em baixas concentrações, tal como se indica no Quadro 12.3.

Quadro 12.3- Efeitos do ácido sulfídrico nos humanos (Seadi *et al.*, 2008)

Concentração de H <sub>2</sub> S	Efeito nos humanos
0,03 – 0,15 ppm	Limiar da percepção (Odor a ovos podres).
15 -75 ppm	Dores de cabeça, náuseas, irritações oculares e na garganta assim como vômitos.
150 – 300 ppm	Paralisia dos nervos olfatórios.
>375 ppm	Morte por envenenamento após exposição de várias horas.
>750 ppm	Morte por paragem cardio-respiratória após exposição que pode variar entre 30-60 minutos.
1000 ppm	Morte rápida, em apenas alguns minutos, por paragem cardio-respiratória.

O biogás, quando exposto ao ar, apresenta a tendência para se separar nos seus constituintes. O metano, devido ao facto de ser mais leve do que o ar, fica retido na parte superior de um espaço fechado, pelo que os espaços fechados especialmente susceptíveis à ocorrência de fugas de biogás, devem ser ventilados e devem ser usados equipamentos com máscaras e alarmes de gás (Seadi *et al.*, 2008).

- Riscos diversos – O risco de electrocussão está presente devido aos equipamentos eléctricos que são usados na unidade de digestão anaeróbia (Kossmann *et al.*, 1997). O risco de queimaduras é outro risco presente e que decorre dos sistemas de aquecimento usados no digestor (Kossmann *et al.*, 1997). A par destes riscos ocorrem ainda os riscos biológicos decorrentes do manuseamento dos bio-resíduos alimentares não tratados, o digerido que não foi correctamente higienizado e da proliferação de pragas de animais. Com o intuito de se evitar todos estes riscos deverão ser usados fatos de protecção individual, aquando do manuseamento dos bio-resíduos alimentares não tratados, e deverão ser garantidas as condições de higiene do digerido, através da realização de análises laboratoriais que garantam que os agentes patogénicos estão dentro dos limites definidos no Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro. De referir que a unidade deverá ser fechada e dispor de equipamentos para controlo de pragas (Kossmann *et al.*, 1997).

## 12.12. Odores

Os odores de uma unidade de digestão anaeróbia são provocados pela presença de determinados compostos orgânicos e inorgânicos voláteis. Os problemas mais frequentes causados pelo odor, em unidades de digestão anaeróbia da fracção orgânica dos RSU, resultam da mistura de compostos altamente voláteis, em muito baixa concentração, com o ar. Estes compostos são produzidos numa

unidade de digestão anaeróbia através da decomposição da matéria orgânica que ocorre no exterior do digestor anaeróbio, principalmente nos locais de armazenamento dos resíduos. Muitos destes compostos, responsáveis por odores desagradáveis, são perceptíveis em muito baixas concentrações, na ordem de partes por bilião. Aquando da digestão anaeróbia dos bio-resíduos alimentares sólidos, os principais compostos responsáveis pelos maus odores são o sulfureto de hidrogénio ( $H_2S$ ), o amoníaco ( $NH_3$ ) e outros compostos inorgânicos e orgânicos como o ácido propanóico (Noyola *et al.*, 2006).

O sulfureto de hidrogénio possui um odor característico a ovos podres, como foi mencionado anteriormente, odor este que se sobrepõe geralmente ao odor proveniente dos outros compostos (Noyola *et al.*, 2006). Como foi indicado no Quadro 12.3, o limiar de percepção humano deste gás é de 0,03 – 0,15 ppm, pelo que este é um importante composto a ser removido do biogás, com o intuito de se evitar maus odores para além de se pretender reduzir o efeito potencial de corrosão de materiais (Seadi *et al.* 2008). Deste modo, a unidade de digestão anaeróbia a instalar na FCT/UNL deverá dispor de um sistema para remover o sulfureto de hidrogénio do biogás.

Relativamente ao digerido, o processo da digestão anaeróbia reduz o seu odor em aproximadamente 80%, comparativamente aos bio-resíduos alimentares que dão entrada na unidade (Seadi *et al.* 2008; Kossmann *et al.*, 1997)

Devido ao facto de o sulfureto de hidrogénio ser removido do biogás e de o digerido resultante do processo de digestão anaeróbia não causar problemas no que diz respeito ao odor, o principal problema que a unidade de digestão anaeróbia, a instalar na FCT/UNL, poderá provocar relativamente ao odor, prende-se com os bio-resíduos alimentares que dão entrada na mesma.

Deste modo, é na zona da área não limpa onde se situa o local de armazenamento dos bio-resíduos alimentares, a mesa de triagem e a unidade de pasteurização (alternativa 1), que irão ser produzidos a maior parte dos maus odores desta unidade. Assim, todos estes equipamentos estarão situados numa área isolada e fechada da unidade, com o intuito de evitar a saída de maus odores. Este local deverá possuir uma extracção de ar para o exterior da unidade de digestão anaeróbia, efectuada através de uma chaminé de exaustão, equipada com um biofiltro, com o intuito de efectuar uma eficiente remoção do amoníaco e AGV (Kossmann *et al.*, 1997).

### **12.13. Localização da Unidade de Digestão Anaeróbia no Campus da FCT/UNL**

A unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL, devido à possibilidade de produção de maus odores, deverá ser localizada, onde não interfira com o normal decursos das actividades da FCT/UNL. No entanto e com o intuito de se minimizar a necessidade de compressão do biogás, a unidade de digestão anaeróbia deve igualmente localizar-se perto do local de consumo do biogás. Assim e atendendo a que o local de consumo de biogás será a cantina do *Campus* da



FCT/UNL (opção 2), sugere-se o local indicado na Figura 12.2 como o mais apropriado para instalar a unidade de digestão anaeróbia.



Figura 12.2 - Local de instalação da unidade de gestão anaeróbia

Todos os equipamentos da unidade de digestão anaeróbia, com excepção para o local de armazenamento de longa duração do digerido (alternativa 2) e para o digestor anaeróbio, local de armazenamento temporário do digerido e para o gasómetro irão estar localizados no edifício assinalado na figura. O digestor anaeróbio e o gasómetro irão estar localizados no exterior do edifício cobertos por um telheiro e isolados do acesso a animais e pessoas por uma rede.



### 13. Balanço Energético da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta

Para se efectuar o balanço energético da unidade de digestão anaeróbia tem de se calcular todos os *inputs* e *outputs* energéticos da unidade. Para isso fez-se uma listagem de todos os equipamentos consumidores de energia da unidade (Quadro 13.1) e calculou-se a energia consumida pelos mesmos através da potência necessária para operação dos equipamentos e do seu tempo de operação diário.

Quadro 13.1– Energia consumida pelos equipamentos da unidade de digestão anaeróbia

Equipamento	Modelo	Consumo de energia kW	Tempo de funcionamento por dia (minutos)	Consumo de energia kWh.dia <sup>-1</sup>	Consumo de energia MJ.dia <sup>-1</sup>	Fonte	Preço de venda cliente final (€)	Especificações
Triturador e Misturador <sup>1</sup>	SS-200	1,5	15,0	0,4	1,35	(www.insinkerator.com)	1000	
Pasteurizador (Alternativa 1) <sup>1</sup>	Batch Pasteurizer	10	80,0	13,3	48,00	(www.pladotminidairy.com)	1500	Volume: 150 – 1000 litros
Sistema de agitação do digestor	Propeller mixer	0,55	90,0	0,8	2,97	(www.flender.com)	400	
Compressor de ar <sup>2</sup>	Rena Air 300 Air Pump 702D	0,004	1440,0	0,1	0,35	(www.aquariumguys.com)	30	
Bomba do digerido <sup>1,3</sup>	XF	0,9	15,5	0,2	0,84	(www.leogroup.com.pt)	700	50 l/min
Ventilador do biogás <sup>1</sup>	WD100	0,2	300	1,0	3,60	(www.ibsblowers.com)	600	
Bomba de circulação forçada sistema solar térmico <sup>5</sup>	WIK PG 25 / 30	0,1	900,0	1,5	5,4	(www.wikora.de)	-	
Diversos equipamentos de controlo e iluminação	-	0,05	1440,0	1,2	4,32	(Bisschops, <i>et al.</i> , 2009)	400	

1 – Não funciona dos fins-de-semana e feriados;

2 – Considerando que o mesmo funciona 24 horas por dia;

3 – O tempo de funcionamento entra já em conta com o tempo necessário para bombear, semanalmente, aproximadamente 3,1 m<sup>3</sup> de digerido para a cisterna do tractor;

4 – Considerando que a bomba do sistema de circulação forçada funciona aproximadamente 15 horas por dia.

Com base no Quadro 13.1 obtiveram-se os consumos de energia por dia útil de funcionamento da unidade de 66,8 MJ.dia<sup>-1</sup> e 18,8 MJ.dia<sup>-1</sup> para a operação diária dos equipamentos relativamente às alternativas 1 e 2, respectivamente. Estes consumos dizem apenas respeito aos dias úteis em que a unidade de digestão anaeróbia está em funcionamento, não considerando assim os fins-de-semana e feriados. Nestes dias os consumos de energia da unidade de digestão anaeróbia são inferiores devido ao facto de não ocorrer alimentação de novos resíduos ao digestor e a ventilação de biogás devido à ausência de consumo. Assim, nos dias correspondentes aos fins-de-semana e feriados não funciona o pasteurizador (alternativa 1), o triturador e misturador, o ventilador de biogás e a bomba do digerido. Posto isto, o consumo de energia da unidade de digestão anaeróbia nos dias correspondentes aos fins-de-semana e feriados é de 13,0 MJ.dia<sup>-1</sup>.

Para além do consumo de energia eléctrica calculado anteriormente, a unidade de digestão anaeróbia consome ainda os combustíveis listados no Quadro 13.2 na sua operação.

Quadro 13.2 - Consumo de Combustíveis da Unidade de digestão anaeróbia

Combustível	Alternativa	Volume (l.dia <sup>-1</sup> )	Consumo de energia (MJ.dia <sup>-1</sup> )	Factor de conversão	Fonte
Gasóleo <sup>1</sup>	1	0,25	9,00	35,9 MJ.L <sup>-1</sup>	(www.extension.iastate.edu)
	2	0,50	18,00		
Biogás <sup>2</sup>	1	98,66	2,27	23,0 MJ.m <sup>-3</sup>	Secção 12.6.2
	2	153,44	3,53		

1 – Consumo dias úteis;

2 – Consumo durante os 334 dias de funcionamento da unidade.

No Quadro 13.2 considerou-se que o consumo de gasóleo que o tractor da FCT/UNL utiliza para transportar o digerido da unidade para o seu local de deposição no solo é de 5 litros por mês. Na alternativa 2 considerou-se um consumo maior de gasóleo pois, para além da recolha dos bio-resíduos alimentares existe ainda o transporte do digerido da unidade de digestão anaeróbia para o local de armazenamento de longa duração, pelo que se considerou um consumo mensal de 10 litros de gasóleo.

Com o sistema de aquecimento do digestor anaeróbio escolhido apenas será necessário recorrer, em situações muito pontuais, ao aquecimento do digestor através do termoacumulador a biogás. Deste modo, no cálculo da quantidade média de biogás consumida diariamente (Quadro 13.2) pelo termoacumulador, considerou-se que o sistema de colectores fornece 95% (Secção 12.3) da energia necessária para o aquecimento do digestor e que o rendimento do termoacumulador a biogás instalado (com 100 mm de isolamento térmico) é de 80,0%.

O quadro 13.3 apresenta o consumo anual da unidade de digestão anaeróbia, calculado através do consumo de energia nos dias úteis e nos fins-de-semana e feriados, sem entrar em conta com a quantidade de biogás que é consumida diariamente para aquecer o digestor anaeróbio.

Quadro 13.3 – Balanço Energético da Unidade de Digestão Anaeróbia

	Consumo anual de Energia - Dias Úteis (MJ.ano <sup>-1</sup> )	Consumo anual de Energia – Fins-de-semana e Feriados (MJ.ano <sup>-1</sup> )	Consumo Anual de Energia da Unidade (MJ.ano <sup>-1</sup> )
<b>Alternativa 1</b>	16.979,0	1.433,9	18.412,9
<b>Alternativa 2</b>	8.237,4		9.671,3

No Quadro 13.4 apresenta-se o balanço energético para as alternativas 1 e 2 da unidade de digestão anaeróbia a instalar no *Campus* da FCT/UNL.

Quadro 13.4 – Balanço Energético da Unidade de Digestão Anaeróbia

	Biogás disponível por dia ( $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	Biogás disponível ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	Energia útil produzida por ano ( $\text{MJ} \cdot \text{ano}^{-1}$ ) <sup>3</sup>	Balanço Energético ( $\text{MJ} \cdot \text{ano}^{-1}$ )
<b>Alternativa 1</b>	13,96	3.127,34	71.928,84	53.515,90
<b>Alternativa 2</b>	13,91	3.115,07	71.646,60	61.975,26

1 – Biogás disponível após se ter retirado o biogás necessário para aquecer a unidade de digestão anaeróbia diariamente.

2 – PCI do biogás = 23 MJ (secção 12.6.2)

3 – Considerando que a unidade de digestão anaeróbia valoriza 28 toneladas de resíduos por ano;

Do Quadro 13.4 conclui-se que a alternativa energeticamente mais rentável é a alternativa 2, pois não envolve a utilização de uma unidade de pasteurização que necessita de uma grande quantidade de energia.

### Opção 1 - Queima directa

Como foi referido na secção 10.3, a cantina da FCT e os restantes edifícios são abastecidos por gás propano a granel. Tendo em conta a energia total produzida a partir do biogás, disponível por dia (Quadro 13.4), e considerando que o gás propano apresenta um PCI de  $46,9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  (Mesquita, 2005), conclui-se que o biogás produzido na unidade de digestão anaeróbia evita o consumo de  $1.534 \text{ m}^3$  e  $1.528 \text{ m}^3$  de gás propano, por ano, para as alternativas 1 e 2, respectivamente.

### Opção 2 - Produção de energia eléctrica através de motor-gerador

Para que seja possível produzir energia eléctrica através do biogás da unidade recorre-se a um motor-gerador, pelos motivos apresentados anteriormente.

O moto-gerador sugerido é semelhante ao modelo TW5000H da empresa TechWay ([www.shtengwei.com](http://www.shtengwei.com)). Este motor, a quatro tempos, está especialmente adaptado para funcionar a biogás e possui uma potência nominal de 3,5/4,8 kW e uma potência máxima de 4/5 kW, podendo funcionar a diferentes voltagens, nomeadamente, 110, 220 ou 380 V. Este equipamento consome, em média,  $2 \text{ m}^3$  de biogás por hora. Através da quantidade de biogás disponível (Quadro 13.4) obtém-se um tempo de funcionamento médio durante os dias úteis de aproximadamente 7 horas, tanto para a alternativa 1 como para a 2. Tendo em conta o tempo de funcionamento do motor-gerador e uma potência nominal média de 4,2 kW, obtém-se uma produção média diária de energia eléctrica de 29,2 kWh, correspondendo a 105,2 MJ de energia.

Em termos energéticos, a opção 2 é a mais desfavorável pelo facto de aproximadamente 215 MJ serem perdidos, devido à conversão do biogás para electricidade no motor-gerador ou seja, aproximadamente 67% da energia que dá entrada no motor gerador é perdida.



## **14. Resolução de Dificuldades e Problemas Frequentes da Digestão**

### **Anaeróbia**

#### **Acidificação**

Como foi mencionado na secção 4.2., a acidificação do digestor anaeróbio representa uma das principais causas de falhas do processo de digestão anaeróbia (Alves, 1998). A acidificação leva a que o digestor anaeróbio entre em ciclo, ou seja, o pH a desce para valores inferiores 5, (nível letal para as bactérias metanogénicas) (Ostrem, Nickolas, 2004), o que faz com que a acidez aumente mais, pois estas bactérias são responsáveis pela alcalinidade do processo de digestão anaeróbia. Na maioria das unidades de digestão anaeróbia, uma alcalinidade entre 2500 e 5000 mg  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  é suficiente para se obter um adequado poder tampão no sistema (Gray *et al.*, 2008). Para que seja possível manter a alcalinidade entre estes valores é necessário, por vezes, introduzir hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) (Alves, 1998).

#### **Camada de material flutuante**

A camada de material flutuante, como o próprio nome indica, é uma camada que se pode formar na parte superior do líquido do digestor, devido à acumulação de material flutuante. Esta camada pode possuir uma espessura suficiente para levar à ocorrência de bloqueios de tubagens e impedir a saída do biogás (Sasse, 1991).

Esta camada forma-se devido à entrada de materiais menos densos como a gordura animal e palhas que ficam a flutuar na parte superior do líquido do digestor. Com o intuito de evitar que esta camada se forme pode-se actuar ao nível do digestor, através da colocação de um sistema de agitação e mistura do mesmo, o que nem sempre é o mais eficaz na prevenção da formação desta camada, dado que um correcto pré-tratamento dos resíduos através de trituração e de mistura, representa a solução mais eficaz para se evitar a formação da camada de material flutuante (Bisschops, *et al.*, 2009). Se a camada de material flutuante permanecer por muito tempo na parte superior do digestor, pode secar e formar uma crosta de difícil remoção.

#### **Camada de Espuma**

A formação de uma camada de espuma na parte superior do líquido do digestor constitui um problema muito frequente em diversos digestores anaeróbios. Quando esta camada de espuma atinge uma altura suficiente pode bloquear as saídas de biogás do digestor anaeróbio (Bisschops *et al.*, 2009). A camada de espuma pode formar-se devido a diversas causas não existindo, desta forma, uma solução única para este problema. Misturar a parte superior do líquido do digestor anaeróbio, pulverizar água na parte superior do líquido do digerido e alterar a composição dos resíduos que dão entrada no digestor anaeróbio são algumas das soluções que podem ser aplicadas para prevenir ou eliminar a camada de espuma de um digestor anaeróbio (Sasse, 1991).

#### **Camada de Sedimentos**

A camada de sedimentos forma-se, na parte inferior de um digestor anaeróbio, devido à acumulação de materiais inertes e densos, que não flutuam, como areia, pedras, metais e vidro,

entre outros (Sasse, 1991). Esta camada pode levar à ocorrência de bloqueios e ao desgaste de partes móveis como o sistema mecânico de agitação de um digestor anaeróbio, para além de reduzir o volume efectivo do digestor (Bisschops *et al.*, 2009). Para evitar que a camada de sedimentos se forme num digestor anaeróbio, um correcto processo de triagem dos resíduos tem de ser efectuado com o intuito de se garantir que os materiais descritos anteriormente não estão presentes nos resíduos que dão entrada no digestor. Quando uma camada de sedimentos se forma num digestor, esta deve ser removida antes que causar problemas ao sistema de agitação do digestor anaeróbio e antes de provocar uma redução efectiva do volume do digestor anaeróbio (Bisschops *et al.*, 2009).

### **Recirculação de digerido**

A recirculação de parte do digerido que sai do digestor anaeróbio e a sua adição aos resíduos que vão dar entrada possui diversas vantagens, que foram enunciadas na secção 12.3. No entanto, a par destas vantagens surgem, igualmente, algumas desvantagens tidas na acumulação de substâncias inibidoras como AGV e amoníaco que, como ficou patente na secção 4.4, levam à inibição do processo de digestão anaeróbia (Banks, 2008). Para que se evite a acumulação destas substâncias, devido à recirculação do digerido, tem de ser adicionada água ao digerido que está a ser recirculado, sempre que a concentração destas substâncias for superior aos limites recomendáveis (Banks, 2008).

### **Entupimentos/Fugas**

Os entupimentos ou bloqueios dos equipamentos hidráulicos podem ocorrer devido ao funcionamento incorrecto do sistema de trituração e mistura da unidade, pelo que sempre que ocorra um problema deste tipo deverá inspeccionar-se este equipamento. Os entupimentos podem igualmente ocorrer nas tubagens de biogás devido à camada de material flutuante e à camada de espuma, pelo que todas as medidas descritas anteriormente devem ser aplicadas com o intuito de se evitar este problema (Bisschops *et al.*, 2009).

As fugas podem ocorrer devido a defeitos e a corrosão nos materiais e ao incorrecto funcionamento de válvulas e das ligações das tubagens. Caso a unidade de digestão anaeróbia disponha de uma manutenção apropriada, os riscos de fugas podem ser evitados (Bisschops *et al.*, 2009).



## **15. Manutenção e monitorização da unidade de digestão anaeróbia**

As actividades de monitorização e de manutenção de uma unidade de digestão anaeróbia têm, por objectivo, prevenir a ocorrência de problemas, potenciar a produção de biogás e ainda aumentar o tempo de vida da mesma (Kossmann *et al.*, 1997).

As actividades de monitorização de uma unidade de digestão anaeróbia envolvem o controlo dos seguintes parâmetros (Bisschops *et al.*, 2009):

- pH;
- Temperatura;
- AGV;
- Humidade dos resíduos;
- Produção de biogás;
- Constituição do biogás;
- Agentes patogénicos presentes no digerido.

Pela especificidade e diversidade de equipamentos que compõem uma unidade de digestão anaeróbia, a sua monitorização e manutenção deve ser efectuada por técnicos especializados ou por pessoas formadas e treinadas para a realização destas actividades.



## 16. Análise Financeira da Unidade de Digestão Anaeróbia Proposta

Para a realização da análise financeira foi necessário assumir-se alguns pressupostos que tornassem possível a realização desta projecção. Considerou-se que a unidade de digestão anaeróbia possui um tempo de vida útil de 20 anos, pelo facto de ser aproximadamente este o tempo de vida de diversos equipamentos essenciais à unidade, como o digestor anaeróbio, o gasómetro e o sistema de aquecimento. Na presente análise financeira considerou-se uma taxa de inflação anual média de 4,0% e uma taxa de inflação anual média da energia de 6,5%, tendo em consideração a tendência de evolução da taxa de inflação nos últimos anos em Portugal.

Para a presente projecção apenas se considerou os lucros provenientes da utilização do biogás, uma vez que o digerido será colocado no colectador municipal da FCT/UNL, como foi mencionado anteriormente. Esta análise financeira foi feita tendo em consideração que tanto a quantidade dos *inputs* como dos *outputs* da unidade de digestão anaeróbia não variam ao longo dos 20 anos do projecto.

O Quadro 16.1 apresenta uma listagem dos custos dos equipamentos a serem utilizados na unidade de digestão anaeróbia. A esta listagem deve adicionar-se os equipamentos presentes no Quadro 16.1.

Quadro 16.1 – Equipamentos a utilizar na unidade de digestão anaeróbia

Equipamento	Modelo	Preço de venda ao cliente final (€)	Fonte	Descrição
Sistema de exaustão	Wind Driven Fan	1.300	(www.industrialairventilator.com)	Sistema de ventilação passivo. No preço está incluída a chaminé de extracção e um biofiltro.
Sistema de aquecimento do digestor anaeróbio – Alternativa 1	Sonnenkraft SK500L	3.000	(Martins, 2009)	Preço por metro quadrado 600 euros. Este valor tem incluído o preço das tubagens de ligação, a instalação, o transporte, e o termoacumulador a biogás. Área necessária: Alternativa 1 – 5 m <sup>2</sup> ; Alternativa 2 – 9 m <sup>2</sup> .
Sistema de aquecimento do digestor anaeróbio – Alternativa 2		5.850		
Armazenamento dos resíduos	Feito à medida	500	(www.plarexpoliester.com)	Feito em plástico reforçado, com uma capacidade 1,8 m <sup>3</sup> .
Mesa de triagem	Feito à medida	300	-	Equipamento com características de construção pouco exigentes, pelo que pode ser encomendado a uma serralharia.
Digestor anaeróbio e tanque de armazenamento do digerido	Construído no local	1.250	-	Tanto o digestor anaeróbio como o tanque de armazenamento de digerido irão ser construídos no local da instalação da unidade devido ao facto de ambos serem construídos em betão.

Equipamento	Modelo	Preço de venda ao cliente final (€)	Fonte	Descrição
Local de Armazenamento Longa Duração (Alternativa 2)	Construído no local	2.000	-	Este equipamento, que terá a forma de uma bacia coberta, será construído em betão, no local da sua instalação.
Gasómetro	Feito à medida e com dupla membrana	2.000	(www.mspsp.com)	Volume de armazenamento 42 m <sup>3</sup> .
Motor-gerador (Opção 2)	TW5000H	1.500	(www.shtengwei.com)	-
Bicos de queima de biogás para Fogões (Opção 1)	-	200	(www.made-in-china.com)	-
Custos de Instalação e de adaptação do local para a instalação da unidade de digestão anaeróbia.	-	2.000	-	O preço apresentado inclui a construção da vedação e da cobertura para o gasómetro, digestor anaeróbio e tanque de armazenamento do digerido; e Outras adaptações que sejam necessária fazer ao edifício onde se vai instalar os restantes equipamentos da unidade de digestão anaeróbia
Tubagens e válvulas digerido	-	200	(www.milder.nl)	-
Válvula de segurança biogás digestor anaeróbio	-	200	(www.econosto.uk.com)	-
Tubagens e válvulas biogás	-	400	(www.milder.nl)	-
Equipamento para proceder à recolha dos bio-resíduos alimentares	-	700	-	4 - Contentores de pequena dimensão para bio-resíduos alimentares 1 - Contentor de grande dimensão para bio-resíduos alimentares 1 - Contentor de grande dimensão para RSU
Equipamento de protecção e de segurança para os colaboradores	-	200	-	- Máscara; - Luvas; - Óculos; - Botas; - Vestuário de protecção.
Equipamentos de monitorização e controlo <sup>1</sup>	-	100	(www.fishersci.com)	- Medidor de pH automático e Termómetro

1 – Todas as restantes análises que são efectuadas no decorrer do processo e que foram apresentadas no presente documento, como a quantificação dos agentes patogénicos no digerido, a medição dos ácidos gordos voláteis e as análises à qualidade do biogás produzido, serão efectuadas nos laboratórios da FCT/UNL, não sendo contabilizados desta forma os custos com os equipamentos que são necessários para efectuar estas análises.

No Quadro 16.2 apresentam-se os custos totais para as diversas configurações da unidade de digestão anaeróbia.

Quadro 16.2 - Custos totais da unidade de digestão anaeróbia

		Euros
<b>Total Alternativa 1</b>	Opção 1 - Queima directa	16.980,0
	Opção 2 – Produção de energia eléctrica	18.280,0
<b>Total Alternativa 2</b>	Opção 1 – Queima directa	20.330,0
	Opção 2 – Produção de energia eléctrica	21.630,0

O Quadro 16.3 sistematiza os consumos mensais e os custos anuais decorrentes da exploração da unidade de digestão anaeróbia.

Quadro 16.3 - Consumos mensais e custos anuais decorrentes da exploração da unidade de digestão anaeróbia

Exploração		Custo Unitário	Consumo Dias Úteis	Consumo Fins-de-Semana e Feriados	Custo no 1º Ano de Exploração (€)
Água		0,041 (€·m <sup>-3</sup> )	300 L	-	41,0
Electricidade	Alternativa 1	0,099 (€·kWh <sup>-1</sup> )	18,6 kWh	3,6 kWh	451,1
	Alternativa 2		5,2 kWh	3,6 kWh	155,4
Gasóleo	Alternativa 1	1,40 (€·L <sup>-1</sup> )	0,25 L	-	78,4
	Alternativa 2		0,50 L	.	156,8
Consumíveis (Sacos para recolha dos bio-resíduos alimentares)		1€/50 sacos	15 sacos	.	67,2
Custos de Manutenção		-	-	-	400,0

Através do Quadro 16.3 obtém-se um custo para o 1º ano de exploração da unidade de digestão anaeróbia de 1.037,7 € e de 820,4 € para as alternativas 1 e 2, respectivamente. Atendendo às taxas de inflação apresentadas anteriormente, os custos de exploração totais da unidade de digestão anaeróbia apresentam um total de 35.690,1 € para a alternativa 1 e de 27.254,1 € para alternativa 2, ao fim de 20 anos de exploração.

O Quadro 16.4 sistematiza as receitas anuais decorrentes da exploração da unidade de digestão anaeróbia.

Quadro 16.4 - Receitas anuais decorrentes da exploração anual da unidade de digestão anaeróbia

Produção		Custo Unitário	Produção diária	Receita no 1º Ano de Exploração (€)	Receita no 20º Ano de Exploração (€)
Equivalente Gás propano <sup>1</sup> (Opção 1)	Alternativa 1	0,58 €/m <sup>3</sup> - 1º ano	6,9 m <sup>3</sup>	883,5	2.966,0
	Alternativa 2	↓ <sup>2</sup> 1,92 €/m <sup>3</sup> - 20º ano	6,8 m <sup>3</sup>	896,4	2.923,0
Electricidade (Opção 2)		0,129 €.Kwh <sup>-1</sup> - 15º ano ↓ <sup>3</sup> 0,165 €.Kwh <sup>-1</sup> - 20º ano	29,2 Kwh	843,8	1.082,0
Taxa de Resíduos Sólidos <sup>4</sup>		0,21 €.m <sup>-3</sup> ↓ <sup>2</sup> 0,69 €.m <sup>-3</sup> - 20º ano	0,25 m <sup>3</sup>	11,8	38,6

- 1- Consumo de gás propano que se evita devido à produção de biogás. A quantidade de gás propano que se evita por dia foi obtida com base no PCI do biogás e do gás propano;  
2- Tendo em conta uma taxa de inflação de 6,5 % ao ano;  
3- Durante os primeiros 15 anos de exploração da unidade, após os quais a energia passa a ser vendida em regime de mercado, nas mesmas condições das grandes centrais de produção. O preço de venda da energia ao fim de 15 anos foi obtido tendo em conta a taxa de inflação de 6,5% ao ano e um preço base de venda de energia à rede de 0,05 €.kWh<sup>-1</sup>;  
4- A Taxa de resíduos sólidos é uma taxa que é paga juntamente com a factura da água e que visa cobrir os custos da recolha transporte e valorização ou deposição em aterro dos RSU. O custo unitário desta taxa para o 1º de exploração foi obtido através das facturas da água da FCT/UNL.

O Quadro 16.5 apresenta um resumo da análise financeira da unidade de digestão anaeróbia, decorrente dos Quadros 16.2 e 16.4.

Quadro 16.5 - Resumo da análise financeira

		Custos totais (Instalação) (€)	Custo Total de exploração acumulado ao fim de 20 anos (€)	Receitas totais acumuladas ao fim de 20 anos (€)	Lucro no final do tempo de vida do projecto (€)
Alternativa 1	Opção 1	16.980,0	35.690,1	34.300,5	-18.369,60
	Opção 2	18.280,0		17.445,3	-36.524,71
Alternativa 2	Opção 1	20.330,0	27.254,1	34.804,9	-12.779,22
	Opção 2	21.630,0		17.445,3	-31.438,75

Através da análise do Quadro 16.5 conclui-se que nenhuma das alternativas estudadas é financeiramente viável. A configuração que apresenta o menor défice no final do tempo de vida do projecto, corresponde à unidade de digestão anaeróbia sem sistema de pasteurização (alternativa 2) e com valorização de biogás através de queima directa (opção 1).

De todas as configurações analisadas para a unidade de digestão anaeróbia a mais desfavorável é a que utiliza a metodologia de valorização de biogás através de motor-gerador, devido ao actual valor da tarifa bonificada de venda de energia à rede.

## Conclusões

A digestão anaeróbia é uma tecnologia que se encontra em grande desenvolvimento em Portugal dado que existem diversas unidades, planeadas e em fase de construção, que visam valorizar a fracção orgânica dos RSU de forma centralizada. Este desenvolvimento vem na sequência dos diversos documentos legais que têm surgido em Portugal e na União Europeia, com o objectivo de diminuir a quantidade de resíduos orgânicos que são depositados em aterro, através da digestão anaeróbia e da compostagem. Relativamente a unidades de digestão anaeróbia descentralizadas, dedicadas especificamente à valorização de bio-resíduos alimentares pequena escala, que foi o foco do presente trabalho, não foram registadas unidades desta tipologia em Portugal, para além de experiências realizadas à escala laboratorial.

No que toca a legislação específica, que regulamenta as unidades de digestão anaeróbia da fracção fermentável dos RSU, nada foi encontrado em termos nacionais. Deste modo a unidade de digestão anaeróbia dimensionada no presente documento, visou dar cumprimento a todos os requisitos específicos presentes no Regulamento n.º 1774/2002 (CE), de 3 de Outubro, que determina as regras a que uma unidade de digestão anaeróbia, deste tipo, a ser instalada na União Europeia está sujeita.

A unidade de digestão anaeróbia proposta no presente documento possui, no que toca a parâmetros de reacção, uma gama de temperatura mesofílica e uma monitorização constante do pH com o intuito de verificar ocorrência de possíveis condições de instabilidade do processo decorrentes da acumulação de ácidos gordos voláteis (AGV). A digestão anaeróbia de bio-resíduos alimentares apresenta uma elevada tendência para a acumulação de AGV, devido às características de rápida biodegradabilidade destes resíduos e à ocorrência da etapa da acidogénese, de forma rápida, no processo de digestão anaeróbia.

Relativamente aos parâmetros de operação, o presente estudo aponta para que a unidade de digestão anaeróbia a instalar no Campus da FCT/UNL possua um tempo de retenção hidráulico médio de aproximadamente 40 dias e uma carga orgânica máxima de 8,0 kg SV/m<sup>3</sup>.dia. A unidade deve funcionar pela *via húmida* devido à maior robustez, estabilidade e provas dadas pelo processo no que toca à digestão anaeróbia descentralizada em pequena e muito pequena escala deste tipo de resíduos. Nesta unidade optou-se por um modo de alimentação ao digestor contínuo com o intuito de se obter uma produção de biogás diária e ainda por um reactor simples com o intuito de se diminuir os custos de instalação da unidade e de melhorar o rendimento energético da mesma.

O digestor anaeróbio escolhido para a unidade a instalar no *Campus* da FCT/UNL possui uma tipologia semelhante ao digestor anaeróbio de contacto e um formato semelhante ao modelo chinês. Os equipamentos escolhidos para aquecimento do digestor anaeróbio passam por painéis solares térmicos com o intuito de se maximizar a produção útil de biogás da unidade.

O presente trabalho permitiu concluir que a produção média diária de bio-resíduos alimentares à unidade de digestão anaeróbia é de 125 kg por dia o que possibilita a produção de 14,06 m<sup>3</sup> de biogás por dia, com um poder calorífico inferior (PCI) total de 323,4 MJ por dia.

No que diz respeito ao balanço energético da unidade, das duas alternativas estudadas, concluiu-se que a mais rentável é a que envolve a estabilização do digerido através de armazenamento de longa duração, pois não compreende a utilização de uma unidade de pasteurização, que necessita de uma grande quantidade de energia para a sua operação. Relativamente à valorização do biogás produzido na unidade de digestão anaeróbia, das duas opções analisadas, concluiu-se que a sua valorização através de queima directa, para preparação de refeições na cozinha da cantina do *Campus* da FCT/UNL, é a opção mais rentável em termos energéticos. A conversão do biogás em electricidade através de um motor-gerador é a opção mais desfavorável em termos energéticos devido ao facto de aproximadamente 67% da energia, que dá entrada no motor, ser perdida por ser transformada em energia não útil.

Relativamente à análise financeira, a mesma não se apresentou viável, nas duas alternativas estudadas, devido ao investimento inicial necessário para proceder à aquisição de toda a maquinaria necessária para a instalação da unidade de digestão anaeróbia. A par deste aspecto, o actual baixo preço, do gás propano e da tarifa bonificada de venda de energia eléctrica à rede em regime de microprodução, para a energia eléctrica produzida a partir de biogás, são outras das causas para a não viabilidade financeira da unidade estudada.

Um factor determinante para a viabilidade económica da presente unidade de digestão anaeróbia, passa pela quantidade de resíduos, que valoriza. Uma análise financeira efectuada para a valorização anual de 41,75 toneladas de bioresíduos alimentares, correspondendo à valorização de 125 kg durante 334 dias, concluiu que:

- Para a unidade de digestão anaeróbia sem sistema de pasteurização (alternativa 2) e com valorização de biogás através de queima directa (opção 1), o tempo de retorno do investimento é atingido no último ano de vida do projecto (20 anos);
- Para a mesma configuração, caso a energia eléctrica fosse vendida à rede em regime de microprodução ao preço apresentado em 2008, para os sistemas solares fotovoltaicos, o tempo de retorno do investimento era alcançado no final do décimo quarto ano de funcionamento da unidade.

Posto isto conclui-se que a unidade de digestão anaeróbia projectada para o *Campus* da FCT/UNL apresenta um balanço energético muito favorável à sua implementação, não se apresentando financeiramente viável em nenhuma das alternativas analisadas.

A digestão anaeróbia descentralizada de bio-resíduos alimentares, possibilita a valorização de resíduos, que são produzidos localmente, evitando-se assim gastos energéticos com as



consequentes emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera decorrentes do processo de recolha e de transporte de resíduos para uma unidade de digestão anaeróbia centralizada

Num futuro próximo, e atendendo à elevada volatilidade dos preços da energia, é expectável que se “olhe” para a produção de energia descentralizada de biogás, em unidades de pequena e muito pequena dimensão, cada vez mais como uma opção viável.



## Trabalhos Futuros

Relativamente a trabalhos futuros, considera-se que no seguimento deste trabalho, deverá ser efectuado um estudo comparativo, recorrendo à metodologia de análise de ciclo de vida, entre uma unidade de digestão anaeróbia descentralizada e uma unidade de digestão anaeróbia centralizada, que valorizem a fracção orgânica dos RSU.

Após o presente trabalho, considera-se de elevada relevância a instalação de uma unidade de digestão anaeróbia à escala laboratorial no *Campus* da FCT/UNL. Esta unidade, possibilitaria testar o potencial de produção de biogás dos bio-resíduos alimentares que são produzidos diariamente na FCT/UNL, para além de aprofundar o estudo, da utilização directa de digerido, da digestão de bio-resíduos alimentares, no solo; solução que actualmente não é consensual na comunidade científica.



## Referências Bibliográficas

- Alves, M., (1998). Estudo e caracterização de digestores anaeróbios de leito fixo. Dissertação para Doutoramento em Engenharia Biológica e Química na Universidade do Minho.
- Amaral, L., (1997). Contribuição para o estudo da cinética de degradação anaeróbia de ácidos orgânicos voláteis. Influência da relação substrato/biomassa. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Sanitária, especialidade de Sistemas de Tratamento.
- Anasruron D., Bade O., Körner I. (2010). Nitrogen recovery from biogas plant digestates via solid-liquid separation and stripping. Hamburg University of Technology, Institute of Environmental Technology and Energy Economics.
- Angelidaki, I., Ahring, B., (1995). Establishment and characterization of an anaerobic thermophilic enrichment culture degrading long-chain fatty acids. *Environment Microbiolgy*. n.º61, pp. 2442 - 2445.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2010). Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos - Dados gerais, Valorização e Destino Final- Infra-estruturas e equipamentos.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., Dewil, R., (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* n.º 34, pp. 755 – 781.
- Arsova L., (2010). Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product. M.S. Degree in Earth Resources Engineering. Department of Earth and Environmental Engineering. Foundation of Engineering and Applied Science. Columbia University
- Baber, K., (1995). Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: A modern waste disposal option on the verge of breakthrough. N.º 9, Elsevier Science Ltd. pp. 365-376.
- Baere, L., (2007). Start-Up of Continuous Dry Digestion Plant of Energy Crops. International Conference: Renewable Resources and Biorefineries.
- Banks C., Chesshire M., Heaven S., Arnold R. (2010). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, UK.
- Banks, C., (2008). Biodigestion of kitchen waste - A comparative evaluation of mesophilic and thermophilic biodigestion for the stabilisation and sanitisation of kitchen waste University of Southampton and Greenfinch.
- Berardino, S., (2008). Implementing Biogas Systems in Portugal: Old Barriers and Future Needs. Bioenergy: Challenges and Opportunities.
- Bisschops, I., Spanjers, H., Schuman, E., (2009). Development of decentralised anaerobic digestion systems for application in the UK. Phase 1 – Final report. Lettinga Associates Foundation.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, B., Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*. n.º40, pp. 989 – 995.
- Bridgwater, E., Parfitt, J. (2008). Evaluation of the WRAP Separate Food Waste Collection Trials. WRAP – Final Report
- Capela I., Rodrigues A., Silva F., Nadais H., Arroja L. (2008). Impact of industrial sludge and cattle manure on anaerobic digestion of the MSW under mesophilic conditions. CESAM & Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro – Portugal.

- Carrapato, R., (2010). Produção de biodiesel a partir de óleos alimentares usados por via alcalina: o caso de estudo da FCL-UNL. Dissertação, para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- CCE., (Centro para a conservação da energia) (2000). Guia Técnico de biogás. Ministério da Energia e Geologia.
- Chaggu E., Kasseva M., Kassenga G., Mbuligwe S., (1998). Research and pilot scale demonstration project on recycling of domestic solid waste, case study Sinza, Dar es Salaam. Dar es Salaam: Department of Environmental Engineering, University College of Lands and Architectural Studies.
- Cho J., Park C., (1995). Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. *Bioresource Technology* 52 (3 ):245-253.
- Cláudia, M., (2004). A Situação Portuguesa dos Resíduos Agro-Pecuários; Potencialidades da Valorização Energética do Biogás. AREAC - Agência Regional de Energia e Ambiente do Centro.
- Climenhaga M., Banks C., (2008). Anaerobic digestion of catering wastes: effect of micronutrients and retention time. *Water Science and Technology*. n.º57, pp:687-692.
- Coates, J., (1991). Development, characterisation and stabilisation of granular methanogenic sludges. Ph.D. Thesis, National University of Ireland.
- Coates, J., Coughlan, M., Colleran, E., (1996). Simple method for the measurement of the hydrogenotrophic methanogenic activity of anaerobic sludges. pp. 237 – 246.
- Cousiño, A. (2007). Avaliação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos do Campo Militar de Santa Margarida. Dissertação, para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Curry, N., Pillay, P. (2009). Converting Food Waste to Usable Energy in the Urban Environment Through Anaerobic Digestion. Dept. of Electr. & Comput. Eng. Concordia University. Canada.
- Deganutti, R., Palhaci, M., Rossi, M., Tavares, R., Santos, C. (1995). Digestores Rurais.
- Deublein D., Steinhauser A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Weinheim. WILEY-VCH
- DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia, (2011). Renováveis - Estatísticas Rápidas. N.º77
- DGS (German Solar Energy Society), Ecofys, 2005. Planning and installing Bioenergy Systems. A guide for installers, architects and engineers. James & James Ltd.
- Eder B., Schulz H. (2006). Biogas Praxis. Oekobuch Magnum, Staufen.
- Energaia, (2005). Digestão anaeróbia – Metodologia de desenvolvimento. Energia e desenvolvimento sustentável na região do norte.
- Embrapa, (2007). O papel dos bancos de alimentos na redução de desperdício de alimentos.
- Envirogas, (2005). Centrais de Valorização Energética do Biogás de Aterro em Portugal.
- FAO, (1996). Biogas Technology: A Training Manual for Extension. Support for Development of National Biogas Programme. CMS House, Lazimpat Nepal.
- Fuchs, J., Baier, U., Berner, A., Mayer, J., Schleiss, K., (2008). Effects of digestate on the environment and on plant production – results of a research project. FIBL Research Institute of Organic Agriculture.
- Gavala, H., Yenil, U., Skiadas, I., Westermann, P., Ahring, K., (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature *Water Research*, pp. 4561 – 4572.

- Geraldi, M., (2003). The Microbiology of Anaerobic Digesters. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Gray, D., Suto, P., Peck, C. (2008). Anaerobic Digestion of Food waste. East Bay Municipal Utility District.
- Gyalpo, T. (2010). Anaerobic Digestion of Canteen Waste at a Secondary School in Dar es Salaam, Tanzania. Appropriate Rural Technology Institute Tanzania (ARTI-TZ)
- Haandel, A., Lettinga, G., (1994). Anaerobic Sewage Treatment: a practical guide for regions with a hot climate. *John Wiley and Sons Ltd.*
- He, L., (1988). A general view of domestic digesters development in China. *MIRCEN Journal*. n.º4, pp. 109 – 112.
- Henze, M., Arremões, P., (1983). Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors - a literature review, *Wat. Sci. Technol.*, pp. 1 – 101.
- Heo N., Park C., Kang H. (2004). Effects of ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge. *Journal Environmental Science Health A39 (7): 1739 - 1756.*
- Hessami, A., Christensen, S., Gani, R., (1996). Anaerobic Digestion of Household Organic Waste to Produce Biogas. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Masters of Environmental Systems International Development Technology Monash University Clayton, Australia.
- Hilkiah A., Ayotamuno M., Eze C., Ogaji S., Probert S. (2008), Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste.
- Kossmann, W., Hoerz, T., Krämer, P., Pönitz, U., Habermehl, S. (1997). Biogas Digest. *Biogas Basics Volume II.*
- International Energy Agency. (2011). World Energy Outlook 2011 – Factsheet.
- ISR – Dep. de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra (2006). Eficiência Energética e Integração Sustentada de PRE Biogás.
- Jackson, C., Duncan, J. (1991). The effect of the aluminium on anaerobic digestion. pp. 143-148.
- Jørgensen, P. (2009). Biogas – green energy Process. Aarhus University. Denmark.
- Kallimani, V., Guduri, A., Reddy, M., Kallimani, J. (2010). Design and development of a compact high rate digester for rapid bio-methanation from a kitchen waste for Energy generation.
- Khanal, S. (2008). *Anaerobic Biotechnology for bioenergy production. Principles and applications.* Blackwell Publishing, Iowa, USA. pp. 1 – 22.
- Lin, C., (1992). Effect of heavy metals on volatile fatty acid degradation in anaerobic digestion. **n.º 26**, pp. 177-183.
- Lohri C., (2009). Research on anaerobic digestion of organic solid waste at household level in Dar es Salaam, Tanzania.
- Malakahmad, A., Zain, S., Basri, Mohamed, E., Kutty S., Isa, H., (2009). Identification of Anaerobic Microorganisms for Converting Kitchen Waste to Biogas. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. **n.º60**.
- Maotdr E. (2007). PERSU II - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Portugal.
- Marchaim U. (1992) Biogas processes for sustainable development. FAO Agricultural Services. **N.º 95**.

- Martins, P., (2009). Estudo energético de acoplagem de colectores solares a um digestor anaeróbio. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica Universidade de Aveiro.
- Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Llabrés, P., Pavanb, P., (1991). Anaerobic Digestion of the Barcelona Central Food Market Organic Wastes. Plant Design and Feasibility Study. University of Barcelona.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S., Llábrés, P., (2000). Anaerobic Digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*. pp. 3 – 16.
- Mcarty, P., Carty, P., McKinney, R., (1961). Volatile acid toxicity in anaerobic digestion. Journal of the Water Pollution Control Federation , **n.º23**.
- Metcalf, E. (2003). Wastewater Engineering. Treatment and Reuse, McGraw Hill, 4.ª edição, EUA.
- Mesquita, L. (2005). Redes de gás capítulo 2 – Caracterização dos Gases Comustíveis.
- Mitchell M. On-site Composting of Restaurant Organic Waste: Economic, Ecological, and Social Costs and Benefits.
- Monnet, F., (2003). An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. Final report.
- Monte, M., (2010). Contributo para o estudo da valorização energética de biogás em estações de tratamento de águas residuais. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- MREC (Midwest Rural Energy Council), (2000). Anaerobic Digestion of farm and food processing residues. GoodPractice Guidelines.
- Neves, L. (2009). Anaerobic Co-Digestion of organic wastes. Doutoramento em Engenharia Química e Biológica. Universidade do Minho.
- Noyola, A., Sagastume, J., Hernández, J. (2006). Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. Springer.
- Nozhevnikova, A., Chudina, V., (1985). Morphology of the thermophilic acetate methane bacterium *Methanotrix thermoacetophila* sp.. *Nov. Microbiology*. **n.º53**, pp. 618 – 624.
- Ortega L., Barrington, S. Arrington, Guiot S. (2008). Thermophilic adaptation of a mesophilic anaerobic sludge for food waste treatment. *Journal of Environmental Management*. **n.º88**, pp:17 - 525.
- Ostrem, K., Nickolas J., (2004). Greening waste: Anaerobic Digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes.
- Palmisano, A., Morton A., (1996). Microbiology of solid waste. CRC Press. Pp-100-120
- Parker, N. (2007). Integrated Biogas Solutions. AGAMA.
- Parkin, G., Owen, W., (1986). Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. pp. 867-919.
- PERSU II (2007). Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007 – 2016.
- Pires, O., (2007). Sistemas inteligentes para monitorização e controlo de processos integrados de tratamento biológico de efluentes. Universidade do Minho.
- Prescott, L., Harley, J. e Klein, D., (1996), Microbiology, 3.ª edição, WCB Publishers.
- Ralph, M., Dong, G., (2010). Environmental Microbiology Second. *John Wiley & Sons, Inc.*



- Rapport, J., Zhang, R., Bryan, M. Jenkins, R., (2008). Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. Integrated Waste Management Board.
- Reinhart, (2004). Estimation of the Moisture Content in Typical MSW.
- Riuji, L., (2009). Research on anaerobic digestion of organic solid waste at household level in Dar es salaam, Tanzania.
- Sadi, M. (2010). Design and Building of Biogas Digester for Organic Materials Gained From Solid waste. An-Najah National University Faculty of Graduate Studies.
- Sakharova, Z., Abotnova, L., (1976). Effects of pH on physiological and biochemical properties of chemostatic culture of *Bacillus megaterium*. *Mikrobiologiya (Engl Transl)*, 46, 15-21.
- Santos, M. (2010). Contribuição para o estudo da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Dissertação apresentada para obtenção de Grau de Doutor em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Nova de Lisboa.
- Saraiva, D., (2011). Central de Digestão Anaeróbia do Ecoparque da Abrunheira. Ponto de Situação e Desafios.
- Sasse, L., Kellner, C., Kimaro, A. (1991). Improved Biogas Unit for Developing Countries.
- Schreiber, W., (2007). Solving the energy problem MIT (Massachusetts Institute of Technology). **n.º6**
- Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., (2008). Biogas Handbook.
- Semitela, M. (2007). Gestão de Resíduos de Campus Universitários. Caso de Estudo: Campus da FCT/UNL. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Slack, N. (2010). Anaerobic Digestion and North Yorks Moors National Park. Anaerobic Energy Ltd
- Taricska, J., Long, D., Chen, J., Hung, Y., Zou, S., (2009). Handbook of Environmental Engineering, Biological Treatment Processes, **Volume 8**, pp. 589 – 634.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., (1993). Integrated Solid Waste Management. McGraw-Hill.
- Vandevivere, P., Baere L., Verstraete, W., (2001). Types of anaerobic digesters for solid wastes.
- Vaz, F., (2009). As Características da Fracção Orgânica dos RSU Recolhidos Selectivamente na Área Metropolitana de Lisboa e a sua Influência no Comportamento do Processo de Digestão Anaeróbia. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.
- Verma, S., (2002). Naerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Columbia University.
- Vitor F., (2008). Factores determinantes para a recolha selectiva de resíduos orgânicos. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.
- Wellinger, A., (1999). Process design of agricultural digesters. Nova Energie GmbH. Ettenhausen
- Werner, U., Stöhr, U., Hees, N., (1989). Biogas plants in animal husbandry. GTZ-Gate.
- Wolfe , S., (1992). Biochemistry of methanogenesis. The Archaeobacteria: Biochemistry and Biotechnology, *Biochem. Soc. Symp.* **n.º 58**, pp. 41-49.
- Zeikus, J., (1980). Microbial populations in digesters. *Applied Science Publishers, London*, pp. 61 - 89.

Zhang, R. (2007). Characterisation of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresource Technology. N.º98. PP 929-935.

## **Recursos de Internet**

<http://bta-international.de/> > **BTA® Process**, acedido a 18 de Agosto de 2011

<http://www.adelaide.edu.au> > biogas > anaerobic\_digestion, acedido a 20 de Setembro de 2011

<http://www.ambienteonline.pt> > produtos e serviços, acedido a 20 de Setembro de 2011

<http://www.apoa.pt> > Notícias > Notícias Industria e Ambiente, acedido a 20 de Setembro de 2011

<http://www.arti-india.org>, acedido a 15 de Agosto de 2011

<http://www.biomax.com.hk/> acedido a 18 de Agosto de 2011

<http://www.epa.vic.gov.au/> > about-us > news-centre, acedido a 3 de Setembro de 2011

<http://www.fct.unl.pt> > Faculdade, acedido a 20 de Junho de 2011

<http://www.meteo.pt> > Agrometeorologia > Monitorização > Diário, acedido a 15 de Janeiro de 2012

<http://www.vivamgroup.co.in/> > Small Biogas, acedido a 10 de Agosto de 2011

<http://www.wastecap.org> > Food > Organics Scraps, acedido a 3 de Setembro de 2011

<http://www.insinkerator.com> > Household products, acedido a 10 de Dezembro de 2011

<http://www.pladotminidairy.com> > Products, acedido a 12 de Dezembro de 2011

<http://www.flender.com> > Products, acedido a 12 de Dezembro de 2011

<http://www.aquariumguys.com> > Air Pumps, acedido a 17 de Dezembro de 2011

<http://www.leogroup.com.pt> > Bomba Periférica, acedido a 5 de Janeiro de 2012

<http://www.ibsblowers.com> > Products > Biogas Compressor, acedido a 5 de Janeiro de 2012

<http://www.wikora.de> > Downloads, acedido a 7 de Janeiro de 2012

<http://www.extension.iastate.edu> > Farm energy initiative, acedido a 18 de Novembro de 2011

<http://www.shtengwei.com> > Products > Biogas Generator Set, acedido a 15 de Dezembro de 2011

<http://www.industrialairventilator.com> > My Catalog, acedido a 18 de Outubro de 2011

<http://www.plarexpoliester.com> > Tipos de Depósitos, acedido a 15 de Setembro de 2011

<http://www.mspesp.com> > Gasómetro para Biogás, acedido a 2 de Agosto de 2011

<http://www.made-in-china.com> > biogas stove, acedido a 29 de Novembro de 2011

<http://www.milder.nl>, acedido a 29 de Novembro de 2011

<http://www.econosto.uk.com> > Download, acedido a 3 de Dezembro de 2011

<http://www.fishersci.com> > Scientific, acedido a 4 de Janeiro de 2012

<http://www.lipor.pt>, acedido a 4 de Fevereiro de 2012